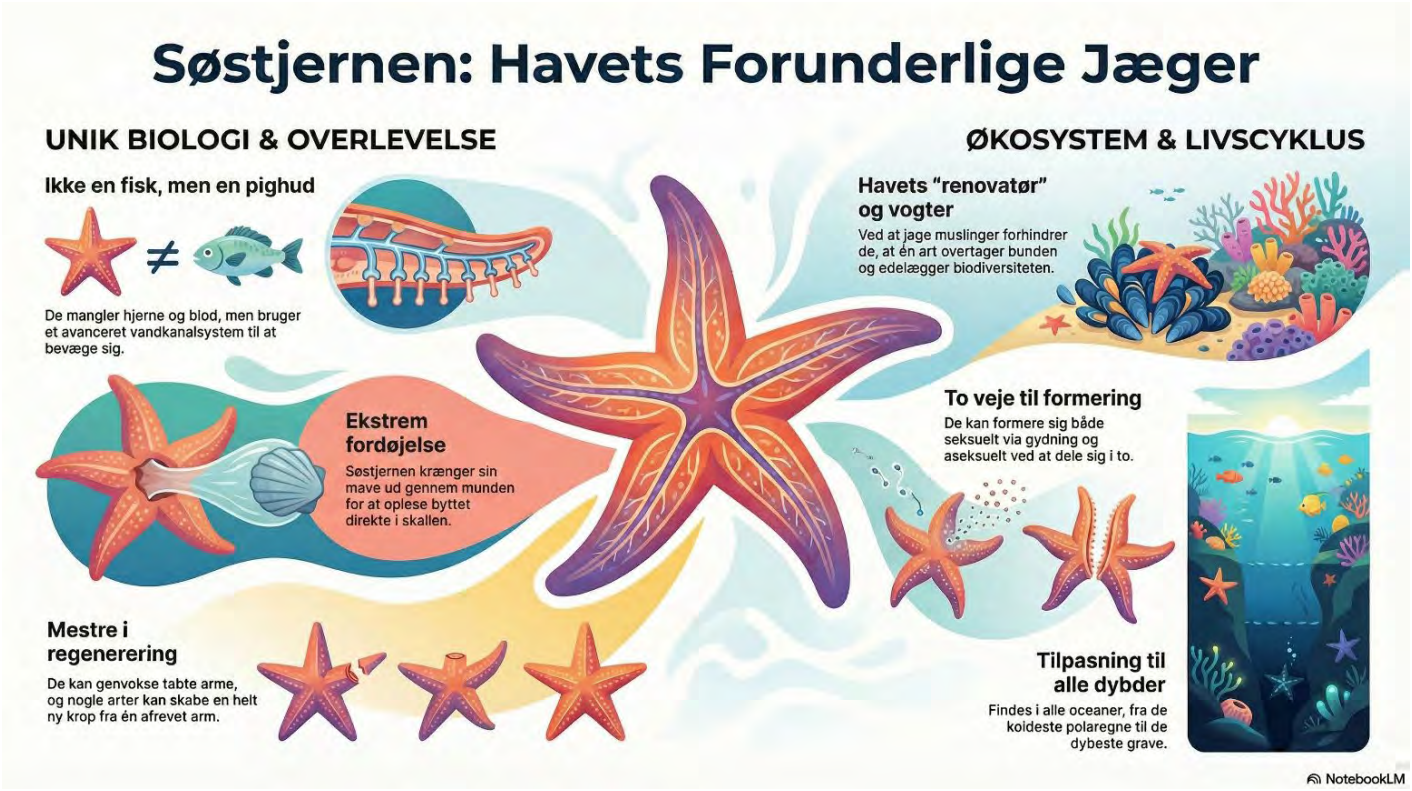
Søstjerner

AI Gemini redigeret af Carl Vedel Lauridsen



Indhold

Kort oversigt 3

1. Liv og Biologi 3

2. Miljø og Økosystem 3

3. Formering: To veje til flere 3

Seksuel formering 3

Aseksuel formering 4

Asteroidea: En omfattende monografi om biologi, reproduktiv plasticitet og økologisk dynamik i foranderlige oceaner 4

1. Introduktion: Asteroideas evolutionære og økologiske betydning 4

2. Anatomisk arkitektur og fysiologiske systemer 5

2.1 Endoskelettet og kropsvægmekanik 5

2.2 Vandkarsystemet (WVS) 6

2.3 Fordøjelses- og udskillelsesfysiologi 7
3. Reproduktionsstrategier: Mellem kloning og spawning 7
3.1 Seksuel reproduktion: Udsendelsesstrategien 8
3.2 Aseksuel formering: Mekanismer for selvreplikation 8
3.3 Larveøkologi: Den planktoniske rejse 9
4. Økologisk dynamik: Prædation, konkurrence og kaskader 11
4.1 Keystone Predator-konceptet 11
4.2 Trofiske Kaskader og "Frygtens Landskab" 11
4.3 Korallivory og revets sundhed 11
5. Casestudie: *Asterias rubens* i nordeuropæiske farvande 12
5.1 Fordeling og tilpasningsevne 12
5.2 Fysiologiske udfordringer i Østersøen 12
5.3 Trofiske interaktioner i danske farvande 12
6. Patologi og krise: Sea Star Wasting Disease (SSWD) 12
6.1 Epidemiologi og skala 13
6.2 Ætiologi: Jagten på morderen 13
6.3 Klinisk progression 13
6.4 Europæiske udbrud 13
7. Miljømæssige stressfaktorer: Forsuring og hypoksi 14
7.1 Havforsuring (OA) og kalkificering 14
7.2 Hypoksi og kemisk toksicitet 14
8. Bevaringsforvaltning og fremtidsudsigter 14
8.1 Reguleringsbeskyttelse 15
8.2 Interventionsstrategier 15
8.3 Konklusion 15
Citerede værker 16

Kort oversigt

Søstjerner er fascinerende skabninger, der trods deres rolige ydre er effektive rovdyr med en utrolig biologisk tilpasningsevne. Her er et overblik over deres liv, deres rolle i havet og deres unikke måde at føre slægten videre på.

---

1. Liv og Biologi

Søstjerner er ikke fisk, men **pighuder** (echinodermer), hvilket gør dem beslægtet med søpindsvin og søpølser. De mangler en hjerne og ægte blod, men har i stedet et avanceret **vandkanalsystem**.

- **Bevægelse:** Under hver arm sidder hundredvis af små sugestråler (sugefødder). Ved at pumpe vand ind og ud af disse rørfødder kan søstjernen glide hen over havbunden eller klatre på lodrette flader.
- **Sanser:** Selvom de ikke har øjne som os, sidder der en lysfølsom **øjeplet** yderst på hver arm, som kan registrere lys og mørke.
- **Fordøjelse:** Søstjerner har en ret "vild" måde at spise på. Når de fanger et bytte (som en musling), krænger de deres mave ud gennem munden og ind i byttet for at opløse det med enzymer, før de trækker maven ind igen.

2. Miljø og Økosystem

Søstjerner findes i alle verdenshave, fra de varme koralrev til de iskolde polaregnene, og fra tidevandszonen ned til de dybeste grave.

- **Havets "renovatører" og jægere:** De spiller en nøglerolle i at holde bestanden af muslinger og snegle nede. Hvis søstjernerne forsvinder fra et område, kan muslinger hurtigt overtage hele bunden og reducere den biologiske mangfoldighed.
- **Regenerering:** De er mestre i overlevelse. Hvis en søstjerne mister en arm til et rovdyr, kan den vokse en ny ud. Nogle arter kan endda skabe en helt ny søstjerne ud fra blot én afrevet arm og en lille del af den centrale skive.

3. Formering: To veje til flere

Søstjerner har en bemærkelsesværdig evne til at formere sig både seksuelt og aseksuelt.

Seksuel formering

De fleste søstjerner er enten hanner eller hunner (selvom man ikke kan se forskel på ydersiden).

1. **Gydning:** Hannen og hunnen frigiver henholdsvis sæd og æg direkte ud i vandet på samme tid (ofte styret af månefaser eller temperatur).

2. **Larvestadiet:** De befrugtede æg bliver til små svømmende larver, der lever som plankton, før de slår sig ned på bunden og forvandler sig til små søstjerner.

Aseksuel formering

Nogle arter kan formere sig ved **deling**. Søstjernen deler sig simpelthen i to midt over, hvorefter begge halvdele regenererer de manglende dele. Dette resulterer i to genetisk identiske kopier.

Asteroidea: En omfattende monografi om biologi, reproduktiv plasticitet og økologisk dynamik i foranderlige oceaner

1. Introduktion: Asteroideas evolutionære og økologiske betydning

Klassen Asteroidea, i daglig tale kendt som søstjerner, udgør en af de mest evolutionært distinkte og økologisk indflydelsesrige linjer inden for stammen Echinodermata. Med cirka 1.900 nulevende arter har denne mangfoldige gruppe med succes koloniseret alle større marine levesteder på Jorden, fra de kaotiske hydrodynamiske miljøer i tidevandszonen til de knusende tryk på de afgrundsløse sletter i dybder over 6.000 meter.[1] Som deuterostomer indtager asteroider en kritisk evolutionær position, idet de deler en tættere fylogenetisk tilknytning til chordater—og dermed også hvirveldyr—end til langt de fleste andre hvirvelløse dyrestammer. Dette forhold er dybt kodet i deres embryonale udvikling, kendetegnet ved radial kløvning og dannelsen af anus fra blastoporen, træk der adskiller dem fra protostomlinjerne, der dominerer store dele af den marine hvirvelløse organisme.[2]

Asteroideas biologiske succes tilskrives en unik række morfologiske og fysiologiske tilpasninger. Deres pentaradiale symmetri, en sekundær afledning fra en bilateralt symmetrisk larveform, muliggør et decentraliseret sensorisk og lokomotorisk system, der kan interagere med omgivelserne i alle retninger samtidigt. Denne kropsplan understøttes af et endoskelet af kalkholdige ossikler og en hydraulisk lokomotorisk mekanisme kendt som vandvaskulært system, som erstatter de energimæssige krav fra tunge muskulære lemmer med et væskebaseret system af ekstension og tilbagetrækning.[3]

Økologisk set er asteroider langt mere end passive bentiske beboere; de er dynamiske strukturingeniører af havbunden. I mange økosystemer fungerer de som nøglearter – et begreb oprindeligt defineret af den dybtgående indflydelse fra okker-søstjernen (*Pisaster ochraceus*) på strukturen af intertidale samfund. Ved at udøve topstyret rovdyrkontrol over

dominerende konkurrenter som muslinger og søpindsvin opretholder søstjerner biodiversiteten og muliggør sameksistensen af utallige andre arter.[3] Denne afgørende rolle placerer dog asteroidepopulationer i centrum for moderne marine bevaringskriser. De synergistiske effekter af menneskeskabte klimaforandringer, havforsuring og virulente patogener har udløst nogle af de største dyredødsfald i registreret historie, især de katastrofale Sea Star Wasting Disease (SSWD)-hændelser, der har decimeret bestande over hele den nordlige halvkugle.[6]

Denne rapport giver en udtømmende syntese af den nuværende videnstilstand vedrørende Asteroidea. Den udforsker de indviklede detaljer i deres anatomi og fysiologi, plasticiteten i deres dobbelte reproduktionsstrategier, den komplekse kemiske signalering der dikterer deres livscyklus, og de dybtgående miljømæssige udfordringer, der truer deres overlevelse i antropocæn.

2. Anatomisk arkitektur og fysiologiske systemer

Asteroidens fysiske form er et vidunder inden for biomekanisk ingeniørkunst, der balancerer stivhed til beskyttelse med den fleksibilitet, der kræves for prædation og bevægelse. Denne balance opnås gennem integrationen af tre specialiserede systemer: det kalkholdige endoskelet, det mutable kollagene væv og det vandbaserede karsystem.

2.1 Endoskelettet og kropsvægmekanik

I modsætning til leddyrs exoskeletter er asteroideskelettet internt, stammer fra mesodermet og dækkes af epidermis.

2.1.1 Ossikelsammensætning og stereomstruktur

Skelettet består af tusindvis af individuelle calciumcarbonatplader. Disse er ikke solide blokke af calcit, men konstrueres som et porøst net kendt som stereom. Denne mikroarkitektur tjener et dobbelt formål: den reducerer skelettets vægt betydeligt uden at gå på kompromis med den strukturelle integritet, og de mellemliggende rum i nettet tillader infiltration af levende væv, hvilket forhindrer den sprødhed, der er forbundet med faste mineralstrukturer.[4] Den kemiske sammensætning af disse plader er højmagnesiumcalcit, en mineralform, der er mere opløselig end ren calcit eller aragonit. Denne opløselighed har dybtgående konsekvenser for søstjerners modtagelighed for havforsuring, da de metaboliske omkostninger ved at opretholde disse strukturer stiger, efterhånden som havvandets mætningstilstand falder.[8]

2.1.2 Mutabelt kollagenøst væv (MCT)

Forbindelsen pladerne er en specialiseret form for bindevæv, der er unik for pighuder, kendt som mutabelt kollagent væv (MCT) eller "catch bindevæv." Dette væv har den bemærkelsesværdige fysiologiske evne til at ændre sine trækegenskaber under neural

kontrol, idet det skifter fra en tilstand af næsten flydende fleksibilitet til knoglelignende stivhed på få sekunder.

- Fysiologisk mekanisme: Ændringen i viskositet opnås ikke ved muskelkontraktion, men ved at ændre kohæsionen mellem kollagenfibriller og den interfibrillære matrix. Dette gør det muligt for søstjernen at opretholde en stiv holdning (f.eks. at åbne en musling) i længere perioder med næsten nul energiforbrug, en klar fordel i forhold til muskelkontraktion, som kræver kontinuerligt ATP-forbrug.[10]
- Adaptiv funktion: MCT er også mekanismen bag autotomi (selvamputation). Som reaktion på prædation eller fangenskab kan søstjernen hurtigt "flyde" bindevævet ved roden af en arm, hvilket gør det muligt at løsne sig med minimal vævstraume. Denne proces er vital for overlevelse og fungerer hos nogle arter som en forløber for aseksuel formering.[10]

2.2 Vandkarsystemet (WVS)

Det definerende kendetegn ved stammen Echinodermata er vandkarsystemet, et hydraulisk netværk afledt af coelomet, som fungerer i bevægelse, respiration, affaldstransport og sanseopfattelse.

2.2.1 Hydraulisk anatomi

Systemet fungerer efter et princip om hydrostatisk tryk. Havvand trænger ind via madekoritten, en sigtelignende forkalket plade, som normalt er placeret på den aborale overflade. Maderosritten forbinder til stenkanalen, som løber ned til en ringkanal, der omkranser mundingen. Fra denne centrale ring strækker radiale kanaler sig ned langs aksen af hver arm. Langs radialkanalerne forbinder laterale kar til rørfødderne (podia), som trænger ind i kropsvæggen.[3]

2.2.2 Podial bevægelse og adhæsion

Bevægelse opnås gennem koordineret aktivitet mellem rørfødderne og deres tilknyttede interne reservoirer, ampullerne.

- Ekstension: Musklerne i ampullen trækker sig sammen, hvilket tvinger væske ind i podiet og får det til at forlænges. En ventil i den laterale kanal forhindrer tilbagestrømning ind i radialkanalen.
- Adhæsion: Når podiet rammer substratet, trækker midten af terminalskiven sig tilbage og skaber et vakuum. Forskning viser dog, at adhæsion primært er kemisk og ikke udelukkende sugbaseret. Specialiserede sekretoriske celler i podiale epidermis frigiver adhæsive proteiner, der binder sig til substratet. For at løsne sig frigiver en anden celletype et adklæbrigt kemikalie, som bryder bindingen.[2]
- Tilbagetrækning: Længdegående muskler inde i podiet trækker sig sammen, hvilket tvinger væske tilbage i ampullen og forkorter foden. Ved at koordinere tusindvis af disse rørfødder—*Pycnopodia helianthoides* har cirka 15.000—kan en søstjerne generere betydelige træk- og bevægelseshastigheder på op til 160 cm i minuttet.[6]

2.3 Fordøjelses- og udskillelsesfysiologi

Asteroidens fordøjelsessystem er tilpasset makrofagi (at spise store genstande) og udviser en høj grad af anatomisk fleksibilitet.

2.3.1 Mave-eversion og ekstra-oral fordøjelse

Tarmen er kort og lodret orienteret. Munden åbner sig ud i en hjertemave, som er forankret til kropsvæggen af mavebånd. Over dette ligger den mindre pylorusmave, som forbinder til parrede fordøjelseskirtler (pylorus caeca) i hver arm. Et kendetegn ved Asteroidea er evnen til at vende hjertets mave ud. Når den fanger bytte, såsom en musling, bruger søstjernen sine rørfødder til at trække ventilerne en smule fra hinanden. Den klemmer derefter sin hjertemave gennem sprækken (så lille som 0,1 mm) og ind i byttets skal. Fordøjelsesenzymer udskilles direkte på byttets bløde væv og opløser dem på stedet. Den resulterende næringsbouillon optages derefter af maven eller pumpes ind i pylorus-ceca for intracellulær fordøjelse og opbevaring.[1] Denne mekanisme gør det muligt for søstjerner at spise bytte, der er betydeligt større end deres mundåbning.

2.3.2 Udskillelse og osmoregulering

Asteroider mangler generelt specialiserede udskillelsesorganer som nyrer. Kvælstofholdigt affald, primært i form af ammoniak, diffunderer over de tynde vægge i rørfødderne og specialiserede luftvejsstrukturer kaldet papuler (hudgæller).

- Papiler: Disse er delikate, fingerlignende udvækster af coelom, der strækker sig gennem kropsvæggen. De øger markant overfladearealet til gasudveksling og udskillelse.
- Coelomocytter: Den coelomiske væske indeholder amøbeoide celler kaldet coelomocytter. Disse celler fagocytiserer partikelaffald og fremmedlegemer i coelomet. Når de er fyldt med affald, migrerer de til spidserne af papulaerne og bliver klemt af, hvilket effektivt udleder affaldet ud i det omgivende vand.[2]
- Osmokonformitet: De fleste asteroider er osmokonformere, hvilket betyder, at deres indre kropsvæsker er isotoniske med det omgivende havvand. De har ringe evne til ionregulering, hvilket begrænser de fleste arter til fuldt marine miljøer. *Asterias rubens* er en bemærkelsesværdig undtagelse, da den besidder en begrænset evne til at regulere cellevolumen, hvilket gør det muligt for den at trænge ind i det brakvand i Østersøen, selvom dette medfører betydelig fysiologisk stress.[13]

3. Reproduktionsstrategier: Mellem kloning og spawning

Asteroidea udviser en bemærkelsesværdig reproduktiv plasticitet, der gør det muligt for dem at overleve i varierende miljøer. De benytter både seksuel formering, som sikrer genetisk diversitet og spredning, og aseksuel formering, som muliggør hurtig populationsudvidelse og vedvarende bestanddel i lavtæthedsscenarier.

3.1 Seksuel reproduktion: Udsendelsesstrategien

Den dominerende formeringsform i asteroider er seksuel, typisk med separate køn (gonochorisme) og udsendte gydning.

3.1.1 Anatomi og frugtbarhed

Reproduktionssystemet består af parrede gonader, der er placeret i coelom på hver armbase. Disse gonader gennemgår cyklisk udvidelse og fylder ofte hele armhulen før gydning. Reproduktionspotentialet for store asteroider er enormt; en enkelt *hun-Acanthaster planci* (tornekrone) kan frigive op til 200 millioner æg i en enkelt sæson.[14] Denne strategi, kendt som rovdyrmætning, sikrer, at på trods af høj dødelighed i planktonstadiet, overlever nok larver til rekruttering.

3.1.2 Synkroniserings- og spawnsignaler

For at udsendelsesgydning skal lykkes, skal han- og hun-gameter frigives samtidigt. Denne synkronisering formidles af et hierarki af miljømæssige og kemiske signaler.

- Nære signaler: Ændring i dagslængde (fotoperiode) og vandtemperatur regulerer modningen af gameter (gametogenese). Hos *Asterias rubens* i Nordsøen finder gydningen typisk sted mellem maj og juli, timet til at falde sammen med forårsblomstringen af planteplankton, som vil opretholde larverne.[13]
- Ultimative triggere: Den endelige frigivelse af gameter udløses ofte af specifikke feromoner. Når et individ gyder, frigiver det gameter sammen med hormonelle signaler, der får naboindivider til at gyde. Denne "epidemiske gydning" skaber en tæt sky af gameter i vandkolonnen, hvilket maksimerer gødningssuccesen.[2]

3.1.3 Hermafroditisme og grubleri

Selvom de er sjældne, udviser nogle asteroider hermafroditisme. *Nepanthia belcheri* er for eksempel en protandrous hermafrodit, der først fungerer som han og senere som hun. Dette følger ofte efter en fissionsbegivenhed, hvor de regenererende individer gennemgår kønsskifte.[10] I polare eller dybhavsmiljøer, hvor planktonisk føde er knap, springer nogle arter larvestadiet helt over. Disse "rugere" opbevarer store, blommerige æg på deres mundoverflade eller i en specialiseret yngelpose og beskytter dem, indtil de kommer ud som fuldt udviklede unger.

3.2 Aseksuel formering: Mekanismer for selvreplikation

Aseksuel formering gør det muligt for søstjerner at skabe klonale linjer. Dette er særligt fordelagtigt for kolonisering af nye habitater, hvor partnere kan være få, eller for hurtigt at komme sig efter bestandsnedbrud.

3.2.1 Fissiparitet (Diskal Fission)

Fissiparitet involverer den spontane opdeling af den centrale skive i to dele, som hver især regenererer de manglende arme og skivesektoren.

- Taksonomisk udbredelse: Denne adfærd er karakteristisk for familien Asteriidae (f.eks. *Coscinasterias*, *Stephanasterias*, *Sclerasterias*) og familien Asterinidae.[10]
- Fissionsprocessen: I *Coscinasterias tenuispina* forudgås fission ofte af udviklingen af flere madreporitter, hvilket kan være en fysiologisk forudsætning for at opretholde de splittede halvdele. Skiven flår hen over et bestemt plan, hvilket normalt resulterer i fragmenter med ulige antal arme (f.eks. en 7-armet stjerne, der deler sig i en 3-armet og en 4-armet brik).
- Økologiske implikationer: Bestande af *Stephanasterias albula* i Maine synes at være obligatorisk fissiperende og formerer sig næsten udelukkende ved fission i foråret og sommeren. Dette resulterer i populationer, der i det væsentlige er klonale monokulturer.[10]

3.2.2 Autotomi og "Kometen"

Autotomi er primært en forsvarsmekanisme for at undslippe prædation, men i slægten *Linckia* er den blevet taget i brug til formering.

- Mekanisme: En arm afsættes sammen med en lille del af den centrale skive eller tilstrækkeligt neuralt/coelomisk væv til at understøtte uafhængig overlevelse. Denne løsrivne arm, kendt som en "komet", opfører sig som en selvstændig organisme.
- Regenereringskinetik: Regenereringen af et helt individ fra en enkelt arm er en energimæssigt dyr og langsom proces. Hos *Linckia multifora* tager det cirka 10 måneder for en komet at regenerere en lille central skive og fire nye armknopper (ca. 1 cm lange). Processen begynder med sårheling (10 dage), efterfulgt af dannelsen af en halvmåneformet kam, der differentierer sig til de nye mundstrukturer.[10]
- Overlevelsesrater: Kometer er meget sårbare over for infektion under den indledende helingsfase. Men når såret først er lukket, forbedres overlevelsesraten markant. Evnen til at regenerere fra fragmenter så små som 1 cm fremhæver den ekstreme plasticitet i asteroidevæv.[10]

3.3 Larveøkologi: Den planktoniske rejse

For udsendte gydearter involverer livscyklussen en kompleks, indirekte udviklingsvej med tydelige larvestadier.

3.3.1 Bipinnaria og Brachiolaria

- Embryogenese: Befrugtningen giver en blastula, som invaginerer og danner en gastrula. Når deuterostomer dannes blastoporen til anus, og en ny åbning dannes i munden.[1]
- Bipinnaria-stadiet: Embryoet udvikler sig til en bipinnaria-larve , en bilateralt symmetrisk organisme udstyret med cilierede bånd. Disse cilier tjener en dobbelt

funktion: bevægelse og suspensionsfodring. Bipinnaria driver i planktonet, lever af fytoplankton og ophober energireserver.[16]

- Brachiolaria-stadiet: Efter flere uger forvandles bipinnaria til en brachiolaria-larve . Dette stadie er kendetegnet ved udviklingen af tre specialiserede arme (brachia) og en central adhæsiv skive på præorallapen. Disse strukturer er ikke til føde, men er sanse- og tilhæftningsorganer, der bruges til at teste substratet for egnethed til bosætning.[1]

3.3.2 Bosættelsens biokemi

Bosættelse er det mest kritiske checkpoint i asteroidens livscyklus. Larver slår sig ikke ned tilfældigt; De har kemoreceptorer, der er indstillet på specifikke miljømæssige signaler, som indikerer et habitat af høj kvalitet.

- Biofilm og bakterielle signaler: Marine biofilm—komplekse samfund af bakterier og kiselalger, der dækker nedsænkede overflader—er de primære sætningsindløsere. Forskning har identificeret, at det ikke er bakterierne selv, men specifikke molekylære komponenter, der udløser bundfald. For eksempel er O-antigen-polysakkaridkæden af lipopolysaccharidmolekylet (LPS) fra bakterien *Cellulophaga lytica* blevet udpeget som et potent metamorft signal.[17] Tilsvarende inducerer fosfolipider og exopolysaccharider fra *Pseudoalteromonas-bakterier* metamorfose hos andre pighuder.[18]
- Korallalger: For de koralædende *Acanthaster planci* er bundsætningen stærkt induceret af skorstelorlinalger (CCA), især arten *Melyvonnea cf. madagascariensis*. Denne specifikke tiltrækning sikrer, at larverne sætter sig direkte på revmatricen, hvor deres algefødekilde (og senere koralbytte) er rigeligt.[19]
- Konspecifik tiltrækning: Voksne feromoner kan også tiltrække larver, hvilket fører til selskabelig bosættelse. Denne mekanisme hjælper med at opretholde befolkningstætheden, men kan også føre til overbelægning eller sygdomsoverførsel.[2]

3.3.3 Metamorfose: En katastrofal omorganisering

Når det rette signal opdages, fæstner brachiolarien sig til substratet ved hjælp af sin klæbende skive. Dette igangsætter metamorfose, en radikal proces hvor larvekroppen i det væsentlige skilles ad og rekonstrueres.

- Symmetribrud: Larvens bilaterale symmetri udslettes. Venstre side af larven vokser til den voksnes mundoverflade, mens højre side bliver den aborale overflade. Larvens mund og anus forsegles, og nye dannes i pentaradial konfiguration.
- Organogenese: Larve-koelomet opdeles i komparter for at danne det vandbaserede vaskulære system. Den unge søstjerne, ofte mindre end 1 mm i diameter, kaster til sidst larvestilken af og går væk som et bentisk rovdyr.[1]

4. Økologisk dynamik: Prædation, konkurrence og kaskader

Søstjerner er økologisk potente organismer. Deres fødeaktiviteter kan bestemme zoneringen af tidevandssamfund, koralrevenes sundhed og kulstoflagringskapaciteten i tangskovene.

4.1 Keystone Predator-konceptet

Den økologiske betydning af søstjerner blev cementeret af Robert Paines fjernelseseksperimenter med *Pisaster ochraceus* i det nordvestlige Stillehavsområde. Paine påviste, at *Pisaster* foretrækker muslingen *Mytilus californianus*, en dominerende konkurrent om plads. Ved at holde muslingebestandene i skak *forhindrer Pisaster,* at de monopoliserer klippevæggen, hvilket tillader rur, alger og svampe at sameksistere. Denne uforholdsmæssige påvirkning af samfundsdiversiteten i forhold til dens forekomst definerede *Pisaster* som en "nøgleart".[5]

En lignende dynamik findes med solsikkestjernen, *Pycnopodia helianthoides*. I subtidale tangskove fungerer *Pycnopodia* som et generalistisk rovdyr, men har en afgørende rolle i at kontrollere bestande af purpursøpindsvin, *Strongylocentrotus purpuratus*. *Pycnopodia* er en glubsk føde, der kan fordøje søpindsvin hele og bevæge sig hurtigt for at jage bevægeligt bytte.[6]

4.2 Trofiske Kaskader og "Frygtens Landskab"

Søstjernernes indflydelse rækker ud over direkte forbrug. De skaber et "landskab af frygt", der ændrer byttets adfærd.

- Ikke-forbrugende virkninger: Når lilla søpindsvin opfanger den kemiske duft af *Pycnopodia*, flygter de til sprækker eller holder op med at græsse. Denne adfærdsundertrykkelse beskytter tangskoven, selvom søstjernen ikke fysisk spiser søpindsvinene. Tabet af denne frygtfaktor på grund af søstjernefald har ført til, at søpindsvin græsser dristigt i det fri, slår tangskove ned og skaber "søpindsvinebarrens".[6]
- Byttets forsvar: Evolution har udstyret byttet med specifikke forsvar mod asteroide-prædation. Kammuslinger og filmuslinger kan svømme med jetfremdrift for at slippe væk. Hjertemuslinger bruger deres muskuløse fod til at "stangspringe" væk. Søpølser laver voldsomme bølger for at bryde fri af rørfodernes greb.[6]

4.3 Korallivory og revets sundhed

I Indo-Stillehavet er tornekrone-søstjernen (*Acanthaster planci*) en specialiseret koralæder. Selvom næringsstofforureningen og fjernelsen af rovdyr (som den kæmpe tritonsnegl) er naturlige ved lave tætheder, kan den føre til udbrud af bestande. Et enkelt udbrud kan fortære levende koraller hurtigere, end det kan regenerere, hvilket fører til et faseskift fra et koraldomineret rev til en algedomineret degraderet tilstand.[14] Forståelse af bosættelsessignalerne (CCA) for *Acanthaster* er afgørende for at håndtere disse udbrud.[19]

5. Casestudie: *Asterias rubens* i nordeuropæiske farvande

I den danske marine miljøs kontekst ("Søstjerne") er den almindelige søstjerne *Asterias rubens* den biologiske standard.

5.1 Fordeling og tilpasningsevne

Asterias rubens er den mest udbredte asteroide i det nordøstlige Atlanterhav og strækker sig fra de arktiske farvande i Norge til Senegals kyst. I Danmark er den allestedsnærværende, og findes i det højenergiske miljø ved Nordsøen, de beskyttede fjorde i Kattegat og det brakvand i Østersøen.[13]

5.2 Fysiologiske udfordringer i Østersøen

Overgangen fra det fuldt marine Nordsø til det brakvandte Østersø udgør en alvorlig fysiologisk udfordring.

- Salinitetsstress: *A. rubens* er osmokonformer. I det vestlige Østersø, hvor saltholdigheden kan falde under 15 PSU (Practical Salinity Units), skal søstjernen tåle cellulær hydreringsstress. Selvom de kan overleve, er deres vækstrater reduceret, og deres maksimale størrelse er mindre sammenlignet med Nordsøpopulationerne ("dværgvækst").
- Reproduktionsbegrænsning: Lav saltholdighed påvirker larveudviklingen negativt. Bipinnaria-larverne er følsomme over for osmotisk tryk, og vellykket rekruttering i det indre Baltikum er sjælden, ofte afhængigt af tilstrømning af saltvand og larver fra Kattegat under stormbegivenheder.[22]

5.3 Trofiske interaktioner i danske farvande

- Rovdyr: I Østersøen er *A. rubens* en primær rovdyr på muslingen *Macoma balthica* og den almindelige musling *Mytilus edulis*. Den konkurrerer direkte med demersale fisk (såsom rødspætte og rødspætte) om disse bundressourcer.[22]
- Bytteundgåelse: Tilstedeværelsen af *A. rubens* udløser undvigelsesadfærd hos andre bentiske dyr. Den almindelige pølk (*Buccinum undatum*) og andre pighuder bevæger sig aktivt væk fra "lugten" af *Asterias* saponins (overfladeaktive kemiske forsvar).[20]
- Naturlige rovdyr: På trods af sin dominans *bliver A. rubens* jaget af solstjernen (*Crossaster papposus*), store krabber og havfugle som edderænder og måger, når den udsættes ved lavvande.[13]

6. Patologi og krise: Sea Star Wasting Disease (SSWD)

Stabiliteten af asteroidepopulationer globalt er blevet ødelagt af fremkomsten af Sea Star Wasting Disease (SSWD), et dårligt forstået, men ødelæggende syndrom, der repræsenterer en af de mest betydningsfulde marine sygdomsbegivenheder i historien.

6.1 Epidemiologi og skala

Fra 2013 spredte SSWD sig hurtigt langs Nordamerikas stillehavskyst, fra Mexico til Alaska. Den påvirkede over 20 arter af asteroider og forårsagede massedødelighed, der udslettede milliarder af individer. Solsikkestjernen (*Pycnopodia helianthoides*) blev hårdest ramt og oplevede bestandsnedgang på over 90 %, hvilket førte til dens funktionelle udryddelse i mange dele af dens udbredelsesområde.[6]

6.2 Ætiologi: Jagten på morderen

Den årsagsfaktor bag SSWD har været genstand for intens videnskabelig debat.

- Viral hypotese: Indledende forskning i 2014 foreslog en densovirus (Sea Star-associeret Densovirus eller SSaDV) som synderen. Efterfølgende studier fandt dog virusset i asymptomatiske museumsprøver fra årtier tidligere og i raske populationer, hvilket sådede tvivl om, at det var den eneste årsag.[25]
- Bakterielt gennembrud: Nyere forskning (ca. 2025-2026) har identificeret en ny stamme af bakterien *Vibrio pectenicida* som en primær patogen, især i *Pycnopodia*. Denne bakterie blev isoleret fra den coelomiske væske fra afsvindende stjerner. *Vibrio-arter* er opportunistiske patogener, der trives i varmt vand og fungerer som en mekanistisk forbindelse mellem havopvarmning og sygdomsudbrud.[24]
- Miljømæssige udløsere: Sygdommen er stærkt korreleret med vandtemperaturanomalier (marine hedebølger). Varmere vand belaster søstjernens fysiologi (øger det metaboliske behov samtidig med at iltopløseligheden reduceres) og øger samtidig virulensen og replikationsraten af bakterielle patogener.[24]

6.3 Klinisk progression

Sygdommen følger et hurtigt og dødeligt forløb, beskrevet som "smeltning":

1. Lethargi: Dyret stopper med at spise og udviser unormal vridning af armene.
2. Læsioner: Hvide eller lyserøde ulcerative læsioner optræder på ektodermet, ofte startende nær madreporitten eller armspidserne.[25]
3. Nekrose: Læsionerne udvider sig hurtigt, trænger gennem kropsvæggen og eksponerer de indre organer (pylorus, caeca og gonader).
4. Autotomi: Søstjernen begynder at kaste sine arme. I modsætning til defensiv autotomi er dette ukontrolleret; armene kan kravle væk fra den døende centrale skive, før de selv opløses.
5. Opløsning: Den strukturelle integritet af kropsvæggen svigter fuldstændigt på grund af nedbrydning af kollagen, hvilket efterlader en bunke mukoid biologisk affald.[24]

6.4 Europæiske udbrud

Selvom det oprindeligt var et stillehavsfænomen, har SSWD krydset Atlanterhavet. Rapporter fra 2022 og frem bekræfter "spild-lignende" symptomer i europæiske bestande af *Asterias rubens* og solstjernen *Crossaster papposus* i Storbritannien og i Det Irske Hav.

En detaljeret casestudie af A*. rubens* i fangenskab i Tyskland beskrev en 100% dødelighedsbegivenhed karakteriseret ved hudsår og *Vibrio*/*Delftia* bakteriel koinfektion, hvilket bekræftede, at europæiske arter er lige modtagelige for disse patogen-miljø-synergier.[25]

7. Miljømæssige stressfaktorer: Forsuring og hypoksi

Ud over sygdom står søstjerner over for de kroniske pres fra et foranderligt kemisk ocean.

7.1 Havforsuring (OA) og kalkificering

Når havene optager CO_2, falder pH, hvilket reducerer tilgængeligheden af karbonationer, der kræves til kalkdannelse.

- Skeletomkostninger: Søstjerner bygger deres skeletter af højmagnesiumcalcit, som er mere opløseligt end aragonit eller lavmagnesiumcalcit. Under sure forhold stiger den energimæssige omkostning ved at vedligeholde skelettet. Forskning i skrøbelige stjerner viser, at lav pH kan føre til aktiv opløsning af pladerne.[8]
- Larvefølsomhed: Larvestadierne er særligt sårbare. Forsuring kan hæmme væksten af skeletstavene i bipinnaria- og brachiolaria-stadierne. Et mindre eller svagere skelet kan hæmme svømning og fødeeffektivitet, hvilket mindsker sandsynligheden for vellykket bosættelse.[7]
- Kompensatoriske mekanismer: Nogle arter, som *Pisaster ochraceus*, viser modstandsdygtighed over for moderat forsuring, hvis føden er rigelig. De kan opregulere deres stofskifte for at kompensere for de øgede omkostninger ved kalkdannelse. Denne afvejning fjerner dog energi fra somatisk vækst og reproduktion, hvilket potentielt kan føre til mindre, mindre frugtbare voksne i fremtiden.[29]

7.2 Hypoksi og kemisk toksicitet

Eutrofiering (næringsstofforurening) i kystnære farvande fører til algeopblomstringer og efterfølgende døde zoner (hypoksi).

- Mangantoksicitet: I Baltikum og Kattegat ledsages hypoksi ofte af frigivelse af mangan fra sedimentet. Mens *Asterias rubens* er relativt tolerant over for lavt iltindhold sammenlignet med fisk, kan kombinationen af hypoksi og høje mangankoncentrationer være dødelig. Metallet ophobes i rørfødderne og pylorus-caeca, hvilket forstyrrer cellens funktion. Dette understreger, at miljømæssige stressfaktorer sjældent virker isoleret; Det er "multiple stressor"-cocktailen, der driver dødeligheden.[31]

8. Bevaringsforvaltning og fremtidsudsigter

Den funktionelle udryddelse af *Pycnopodia helianthoides* og de fremvoksende trusler mod *Asterias rubens* signalerer et presserende behov for bevarelse af echinodermer.

8.1 Reguleringsbeskyttelse

Solsikkestjernen (*Pycnopodia*) er blevet ansøgt om at blive optaget på listen under den amerikanske lov om truede arter (ESA). En sådan opførelse vil kræve udpegning af kritiske levesteder og udarbejdelse af en føderal genopretningsplan.[6] IUCN har allerede klassificeret den som kritisk truet.[6]

8.2 Interventionsstrategier

- Opdræt i fangenskab: Forskningsinstitutioner som University of Washington er banebrydende metoder til at avle søstjerner i fangenskab. Målet er at identificere genotyper, der er resistente over for SSWD, og opfostre dem til potentiel genintroduktion.[32]
- Kryopreservering: Forskere skaber biobanker af søstjernesæd og æg. Denne genetiske ark sikrer, at selv hvis vilde bestande kollapser helt, bevares artens genetiske diversitet til fremtidige genopretningsindsatser.[24]
- Habitatgenopretning: Da larvebosættelse er cue-afhængig, er genopretning af det bentiske miljø (f.eks. sunde tangskove og skorpekorallinalgeskorper) en forudsætning for den naturlige genopretning af søstjernepopulationer.[19]

8.3 Konklusion

Asteroideaerne er et vidnesbyrd om kompleksiteten i marint liv. Fra deres hydrauliske rørfødder til deres evne til at regenerere hele kroppe fra en enkelt arm repræsenterer de en unik evolutionær bane. Men deres afhængighed af forkalkning, deres gennemtrængelige hud og deres indviklede kemiske kommunikationssystemer gør dem til vagter for havets sundhed. "Smeltningen" af søstjerner er en visceral advarsel om destabilisering af marine økosystemer. At beskytte disse dyr kræver mere end lokal bevarelse; Den kræver en global reduktion af CO_2-udledningen for at afbøde opvarmning og forsuring, der driver sygdom og skeletopløsning. Uden sådanne tiltag vil tabet af disse nøgleingeniører føre til forenklede, mindre produktive og mindre modstandsdygtige have.

Biologisk/økologisk parameter	Detaljer og implikationer
Stamme / Klasse	Echinodermata / Asteroidea (~1.900 arter)
Nøgleanatomi	Pentaradial symmetri, vandvaskulært system (hydraulisk), Mutabel kollagent væv (variabel stivhed).
Primær formering	Seksuel (Udsendelsesgydning, høj frugtbarhed). Synkroniseret af fotoperiode/feromoner.

Aseksuelle mekanismer	Fissiparitet (skivedeling) i Coscinasterias; Autotomi (armaffald) i Linckia.
Larvestadier	Bipinnaria (føde-/spredningstest), Brachiolaria (sætning/substrattest).
Bosættelsessignaler	Bakterielle biofilm (LPS O-antigen), korallinalger (Melyvonnea), konspecifikke feromoner.
Økologisk rolle	Keystone-rovdyr (kontrollerer muslinger/søpindsvin). Trofiske Kaskade-regulatorer.
Primære trusler	SSWD (Vibrio pectenicida + opvarmning), havforsuring (skeletopløsning), hypoksi (mangantoksicitet).
Status for nøglearter	Pycnopodia helianthoides: Kritisk truet (90% tilbagegang). Asterias rubens: Almindelig, men truet af regional SSWD/hypoksi.

Citerede værker

1. Starfish - Wikipedia, tilgået februar 13, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Starfish
2. Asteroidea | INFORMATION | Animal Diversity Web, tilgået februar 13, 2026, https://animaldiversity.org/accounts/Asteroidea/
3. A Review of Asteroid Biology in the Context of Sea Star Wasting ..., tilgået februar 13, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10642522/
4. The Sea Stars (Echinodermata: Asteroidea): Their Biology, Ecology, Evolution and Utilization, tilgået februar 13, 2026, https://www.naturebob.com/sites/default/files/The-Sea-Stars_Biol.-Ecol.-Evol.-Utili.-SFJBBE18.pdf
5. Demography, Ecology, and Management of Sea Star Populations: Introduction to a Special Issue in The Biological Bulletin - The University of Chicago Press: Journals, tilgået februar 13, 2026, https://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1086/718198
6. Petition to List Sunflower Sea Star as Threatened or ... - NOAA, tilgået februar 13, 2026, https://media.fisheries.noaa.gov/2021-09/2021-08-18%20Petition%20sunflower%20sea%20star_508%20compliant.pdf
7. The Skeleton of Postmetamorphic Echinoderms in a Changing World | The Biological Bulletin: Vol 226, No 3, tilgået februar 13, 2026, https://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1086/BBLv226n3p223
8. Dissolving brittle stars hint at implications of ocean acidification, tilgået februar 13, 2026, https://www.anl.gov/article/dissolving-brittle-stars-hint-at-implications-of-ocean-acidification
9. A Review and Meta-Analysis of Potential Impacts of Ocean Acidification on Marine Calcifiers From the Southern Ocean - Frontiers, tilgået februar 13, 2026, https://www.frontiersin.org/journals/marine-

science/articles/10.3389/fmars.2021.584445/full
10. Asexual reproduction in starfish - Wikipedia, tilgået februar 13, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Asexual_reproduction_in_starfish
11. Starfish Reproduction & Autonomy of Limbs - Lesson - Study.com, tilgået februar 13, 2026, https://study.com/learn/lesson/starfish-reproduction-methods-facts.html
12. Starfish | Zoology | Research Starters - EBSCO, tilgået februar 13, 2026, https://www.ebsco.com/research-starters/zoology/starfish
13. Almindelig søstjerne - Naturhistorisk Museum, tilgået februar 13, 2026, https://www.naturhistoriskmuseum.dk/viden-forskning/naturlex/sm%C3%A5dyr/almindelig-s%C3%B8stjerne
14. What Eats the Crown-of-Thorns Starfish? The Evidence Is in the Poop - Smithsonian Magazine, tilgået februar 13, 2026, https://www.smithsonianmag.com/smart-news/what-eats-crown-thorns-starfish-evidence-poop-180975068/
15. How Do Starfish Reproduce? Marine Mating and Regeneration - Outforia, tilgået februar 13, 2026, https://outforia.com/how-do-starfish-reproduce/
16. General anatomy of the brachiolaria larval stage of A. planci prior to settlement and metamorphosis. (Photograph by C.F. Caballes) … - ResearchGate, tilgået februar 13, 2026, https://www.researchgate.net/figure/General-anatomy-of-the-brachiolaria-larval-stage-of-A-planci-prior-to-settlement-and_fig4_264159384
17. Bacterial envelope polysaccharide cues settlement and metamorphosis in the biofouling tubeworm Hydroides elegans - PMC - PubMed Central, tilgået februar 13, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11271524/
18. Two distinct bacterial biofilm components trigger metamorphosis in the colonial hydrozoan Hydractinia echinata | bioRxiv, tilgået februar 13, 2026, https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2019.12.23.887182v2
19. Settlement cue selectivity by larvae of the destructive crown-of-thorns starfish - PMC - NIH, tilgået februar 13, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9873471/
20. Common starfish (Asterias rubens) - MarLIN - The Marine Life Information Network, tilgået februar 13, 2026, https://www.marlin.ac.uk/species/detail/1194
21. Almindelig søstjerne: Hvad man ikke har i hovedet, må man ha' i armene - Kattegatcentret, tilgået februar 13, 2026, https://www.kattegatcentret.dk/livet-i-havet/bunddyr/soestjerne/
22. In-situ investigations on the echinoderm Asterias rubens as a predator of soft-bottom communities in the western Baltic Sea - ResearchGate, tilgået februar 13, 2026, https://www.researchgate.net/publication/240350588_In-situ_investigations_on_the_echinoderm_Asterias_rubens_as_a_predator_of_soft-bottom_communities_in_the_western_Baltic_Sea
23. Creature Feature: Sea Stars (U.S. National Park Service), tilgået februar 13, 2026, https://www.nps.gov/articles/000/creaturefeatureacadiaseastar.htm
24. Marine Mystery Solved: What Causes Sea Star Wasting Disease, tilgået februar 13, 2026, https://www.nwf.org/Magazines/National-Wildlife/2026/Winter/Conservation/Sea-Star-Wasting-Disease-Cause
25. Sea Star Wasting Disease in captive common sea stars (Asterias ..., tilgået februar 13, 2026, https://eafpbulletin.scholasticahq.com/article/73028-sea-star-wasting-disease-in-captive-common-sea-stars-asterias-rubens-examinations-therapy-attempts-and-course-of-disease
26. Scientists Pinpoint Cause of Massive Sea Star Die-Offs, and Suspect a Link to Global Warming - Inside Climate News, tilgået februar 13, 2026,

https://insideclimatenews.org/news/04082025/massive-sea-star-die-offs-global-warming/
27. First report of deadly disease raises concerns for Europe's starfish | Natural History Museum, tilgået februar 13, 2026, https://www.nhm.ac.uk/discover/news/2022/july/first-report-deadly-disease-raises-concerns-europes-starfish.html
28. Metabolic cost of calcification in bivalve larvae under experimental ocean acidification | ICES Journal of Marine Science | Oxford Academic, tilgået februar 13, 2026, https://academic.oup.com/icesjms/article/74/4/941/2660821
29. Elevated water temperature and carbon dioxide concentration increase the growth of a keystone echinoderm | PNAS, tilgået februar 13, 2026, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0811143106
30. The Effect of Ocean Acidification on Calcifying Organisms in Marine Ecosystems - MBARI, tilgået februar 13, 2026, https://www.mbari.org/wp-content/uploads/2015/11/Hofmann-et-al.-2010-OA-on-calcifying-organisms.pdf
31. Manganese Uptake and Lethality in the Sea Star Asterias rubens: Effect of Hypoxia - PMC, tilgået februar 13, 2026, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11993448/
32. Scientists are breeding sea stars to fight climate change | World Economic Forum, tilgået februar 13, 2026, https://www.weforum.org/stories/2021/05/sea-star-climate-change-ocean/