Effekter av klimatförändringar och ökade koldioxidhalter på den marina miljön

– en analys av kunskapsläget kring ekosystem, resiliens och havsförvaltning

FORMAS | ETT FORSKNINGSRÅD FÖR HÅLLBAR UTVECKLING
A SWEDISH RESEARCH COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Effekter av klimatförändringar och ökade koldioxidhalter på den marina miljön
– en analys av kunskapsläget kring ekosystem, resiliens och havsförvaltning

R5:2019
ISBN: 978-91-540-6111-2
Forskningsrådet Formas

Stockholm, maj 2019.

Förord

Sedan januari 2018 arbetar Formas med evidensbaserade miljöanalyser. Det innebär att ta fram sammanställningar, analyser och utvärderingar av resultat från forskning, som sedan kan vara ett vetenskapligt stöd i olika aktörers arbete med att utforma kostnadseffektiva styrmedel och åtgärder. I uppdraget ingår också att identifiera styrmedel och åtgärder vars effekter det saknas tillräcklig kunskap om.

Miljömålsberedningen har i direktiv 2018:44 fått i uppdrag att ta fram en strategi för förstärkt åtgärdsarbete för bevarande och hållbart nyttjande av hav och marina resurser. Som underlag för arbetet med strategin behövs kunskap om befintlig forskning kring tillämpning av havsförvaltning och hur klimatförändringar påverkar haven. Miljömålsberedningen har med anledning av detta frågat Formas om möjligheten att göra en systematisk sammanställning av befintlig forskningslitteratur inom området.

Den här sammanställningen är den första publicerade rapporten från Formas uppdrag med evidensbaserade miljöanalyser. Projektledare för arbetet på Formas har varit Magnus Land. Sammanställningen är utförd av Arvid Bring, Henrik Scharin och Magnus Land. Informationsspecialist Charlotte Åberg har bidragit till sökstrategier och utfört en stor del av litteratursökningarna.

Vi på Formas vill rikta ett stort tack till dem som på olika sätt bidragit i arbetet med denna rapport. Det gäller i synnerhet Thorsten Blenckner och Susa Niiranen, båda verksamma vid Stockholm Resilience Centre vid Stockholms universitet, som har bidragit med en granskning av rapportens vetenskapliga innehåll. Formas ansvarar dock helt för rapporten och de slutsatser som presenteras.

Vi vill också tacka Jorid Hammersland och Christine Annemalm på Miljömålsberedningens kansli för gott samarbete.

Sammanfattning

Haven är av mycket stor betydelse för både klimatsystemet och samhället. Haven fungerar som en broms för den globala uppvärmningen, genom att en stor del av koldioxiden från mänskliga utsläpp hittills tagits upp av vattnet. Haven förser oss också med en mängd olika nyttor som direkt används av samhället, till exempel fiske och rekreation. Den globala uppvärmningen försämrar dock havens klimatreglerande funktion. Havens resurser påverkas också av både uppvärmning och försurning från ökade koldioxidhalter i atmosfären.

För att bidra till arbetet med ett bevarande och hållbart nyttjande av haven har Miljömålsberedningen fått i uppdrag att föreslå en strategi för förstärkt åtgärdsarbete. Som ett led i detta arbete har Formas Miljöanalys genomfört en sammanställning av befintlig forskning om klimatförändringar och havsförsurning, med fokus på Östersjön. Sammanställningen har genomförts genom en systematisk, men begränsad, sökning efter forskningslitteratur. Den ger en bild av vad den marina forskningen om Östersjön främst har fokuserat på. I vissa fall går det även att säga något om vad forskningen är överens om, eller vilka osäkerheter om forskningsläget som finns.

Livet i havet påverkas av ökade koldioxidhalter och klimatförändringar

Forskning om hur klimatförändringar påverkar havet har oftast studerat effekter av högre temperaturer och ändringar av salthalt. Det är vanligast att forskningen undersökt effekter på organismer, men det finns också relativt många studier som undersökt effekter på sammansättningen av olika arter i havet. Både fältstudier och experiment är vanliga. Många studier pekar på att effekter på organismer är komplexa och att flera påverkansfaktorer behöver studeras tillsammans.

Syrehalten i de djupare delarna av Östersjön väntas enligt forskningen att sjunka i ett varmare klimat. De studier som undersökt hur organismer påverkas av syrehalten har till stor del fokuserat på bottenlevande organismer, men även fisk har studerats.

Östersjön har länge påverkats av havsnivåförändringar. Den pågående landhöjningen gör att framtida havsytehöjning kommer att ha betydligt större påverkan i södra Östersjön än i norra, där landhöjningen för närvarande är avsevärt snabbare än havsytehöjningen. Det finns dock osäkerheter i havsytehöjningens framtida takt i Östersjön, eftersom den främst beror på avsmältning av avlägsna istäcken. Havsytehöjningen kommer att fortgå i många århundraden.

Salthalten påverkar hur havsvattnet skiktar sig, och också vilka organismer som befinner sig i olika delar av havet. Många studier har undersökt hur salthalten kan variera i framtiden och vad som påverkar den. I de flesta fall pekas vind, nederbörd och avrinning från land ut som avgörande faktorer som påverkar salthalten. Forskningen visar att salthalten i Östersjön troligtvis kommer att minska i framtiden, även om förändringarna i vissa studier är små.

När haven tar upp koldioxid från atmosfären bildas kolsyra, och en förhöjd halt av koldioxid i atmosfären kan därmed leda till en försurning av haven. Forskningen har undersökt försurningens effekter på såväl enskilda arter som på artsammansättning. Det är vanligt att försurningens effekter

har undersökts i kombination med förhöjda temperaturer. Resultaten är blandade, men flera forskningsstudier har visat att försurningen delvis motverkar effekterna av förhöjda temperaturer hos t.ex. plankton. Temperatureffekterna är dock ofta starkare än försurningseffekterna. Hos torsk är det främst de tidiga levnadsstadierna som undersökts. Det finns studier som indikerar att förhöjda koldioxidhalter kan leda dels till att motståndskraften mot effekterna av en temperaturförhöjning blir lägre, dels att kläckningsframgången och därmed rekryteringen kan bli lägre.

Haven är som nämnts en viktig sänka för koldioxid. Forskningen i Östersjöområdet har inte specifikt studerat frågan om huruvida mänskliga aktiviteter (som fiske, övergödning eller fysisk förändring) påverkar havens förmåga att ta upp koldioxid, åtminstone inte i en omfattande utsträckning. Utifrån den publicerade forskningens inriktning bedömer Formas att storskalig mänsklig påverkan, det vill säga uppvärmning av haven och försurning, är viktigare för havens globala roll som koldioxidsänka än regional påverkan från till exempel fiske och övergödning.

Havens resiliens

Forskning visar att havens motståndskraft och förmåga att återhämta sig från störningar, det vill säga deras resiliens, kommer att vara viktiga för att hantera framtida klimatförändringar. Dessvärre innebär klimatförändringarnas direkta och indirekta effekter (t.ex. temperaturhöjningar, förändrad salthalt, främmande arter) med hög sannolikhet en försämring av den marina resiliensen. Det är därför av stor vikt att vidta åtgärder som främjar havens resiliens.

Resiliensen grundar sig, enligt forskningen, på en mängd olika biologiska och fysiska egenskaper. Förutom klimatförändringar påverkas dessa egenskaper även av andra belastningar som övergödning, fiske, främmande arter, oljespill m.m. Åtgärder som minskar dessa belastningar främjar därför även resiliensen. Åtgärder kan även vidtas som mer direkt riktar sig mot de olika egenskaperna (t.ex. skyddade områden).

Eftersom alla åtgärder inte riktar sig direkt mot resiliens, och eftersom det inte är möjligt att uttrycka resiliens i siffror, är det Formas bedömning att det inte finns förutsättningar att uttala sig om åtgärdernas kostnadseffektivitet för att främja den marina resiliensen. Däremot finns det forskning som bedömer kostnadseffektiviteten av olika åtgärder för att minska en specifik belastning (t.ex. kostnadseffektiviteten av åtgärder som minskar näringsbelastningen).

Modeller, prognoser och scenarier för havsförvaltningen

Inom forskningen används i dagsläget en mängd olika modeller för att beskriva samband mellan orsak och verkan kopplade till olika marina miljöfrågor. Forskningen har, oftast utifrån sådana modeller, även tagit fram en mängd olika prognoser och scenarier för olika aspekter av den marina miljön. Denna sammanställning visar att flest modeller, prognoser och scenarier har tagits fram med fokus på klimatförändringar, övergödning och fiske, medan färre exempel finns för oljespill, främmande arter och miljöfarliga ämnen. Formas kan konstatera att modeller, scenarier och prognoser i viss grad redan används som beslutsunderlag i havsförvaltningen (t.ex. genom Baltic Sea Action Plan (BSAP), EU:s marina direktiv samt EU:s gemensamma fiskepolitik).

Flertalet forskningsstudier inom området betonar att havsförvaltningen måste vara adaptiv, det vill säga anpassningsbar, för att kunna hantera de osäkerheter och komplicerade samband som är

vanliga för marina miljöproblem. Forskningen lyfter även vikten av en ekosystembaserad havsförvaltning som tar hänsyn till hur olika påverkansfaktorer samverkar. Utifrån forskning på området drar Formas därför slutsatsen att havsförvaltningens val av mål, åtgärder och styrmedel behöver vara integrerad över olika marina miljöproblem samt att modeller, scenarier och övervakning är avgörande för att åstadkomma en adaptiv och ekosystembaserad havsförvaltning.

Innehåll

Sammanfattning **2**
1 Introduktion **8**
1.1 Uppdrag och frågeställning **8**
1.2 Syfte och mål **9**
1.3 Metod och begränsningar **9**
1.4 Rapportens disposition **10**
2 Centrala begrepp **11**
2.1 Resiliens **11**
2.2 Åtgärder och styrmedel **11**
2.3 Kostnadseffektivitet **12**
2.4 Modeller **13**
2.5 Prognoser **14**
2.6 Scenarier **15**
3 Utveckling av frågeställningar **16**
4 Metod **22**
Fråga 1-3 ..... **22**
Fråga 4 ..... **23**
Fråga 5 ..... **24**
5 Resultat **25**
5.1 Översikt över frågeområde 1–3 ..... **25**
5.2 Effekter av klimatförändringar på marina och kustnära ekosystem **26**
5.2.1 Effekter av uppvärmning av havsvattnet 26
5.2.2 Effekter av lägre syrehalt 27
5.2.3 Effekter av havsnivåförändringar 28
5.2.4 Effekter av utsötning 29
5.3 Effekter av förhöjda koldioxidhalter på marina och kustnära ekosystem **31**
5.3.1 Effekter av förhöjt partialtryck av koldioxid (*pCO2*) 31
5.3.2 Effekter av förändrade karbonathalter 33
5.4 Bedömning om huruvida övervakningen är tillräcklig **33**
5.5 Havets och kustbiotopers roll som klimatreglerare och CO_2-sänka **34**
5.6 Verktyg/styrmedel inom havsförvaltningen för att stärka resiliensen **35**
5.6.1 Attribut av betydelse för resiliens 36
5.6.2 Påverkansfaktorer för attributen 39

5.6.3 Kostnadseffektivitet av åtgärder och styrmedel 41
5.7 Tillämpning av modeller, prognoser och scenarier i havsförvaltningen..... 44
5.7.1 Modeller, prognoser och scenarier inom forskning 44
5.7.2 Användning av modeller, prognoser och scenarier inom havsförvaltningen..... 46
6 Diskussion 51
6.1 Litteratursammanställningens begränsningar..... 51
6.2 Kunskap och kunskapsluckor 51
6.3 Andra relevanta rapporter 52
7 Slutsatser.....55
Referenser 57

Begreppsdefinitioner

Anpassningsförmåga: Ett ekosystems förmåga att lära sig, kombinera erfarenheter och kunskap, anpassa sig till förändrade externa påverkansfaktorer och interna processer samt förmåga att utvecklas inom den nuvarande stabilitetsdomänen.

Belastningsfaktor: Antropogena belastningar på miljötillståndet (t.ex. näringsämnesbelastning, invasiva arter, oljespill).

Främmande arter: Arter som genom någon form av mänsklig aktivitet introducerats till områden utanför sitt ursprungliga/naturliga utbredningsområde.

Genetisk diversitet: den genetiska variationsrikedomen bland individer eller populationer inom en art.

Habitat: En plats i naturen där det finns ekologiska förutsättningar för en växt- eller djurart att leva.

Invasiva arter: Främmande arter som skadar det ekosystem de introducerats till.

Konnektivitet: Spridningsförmågan mellan arter, populationer och ekosystem.

Kostnadseffektivitet: att ett visst mål uppnås till lägsta möjliga kostnad för samhället, alternativt att största möjliga miljöeffekt nås för en given mängd resurser.

Prognos: Ett förutspått och högst sannolikt framtida händelseförlopp.

Påverkansfaktor: Faktorer som påverkar den marina miljön, vilket inkluderar belastningsfaktorer men även miljötillstånd (t.ex. salinitet) som påverkar andra miljötillståndsaspekter (t.ex. resiliens)

Resiliens: Ett ekosystems motståndskraft och återhämtningsförmåga gentemot störningar.

Scenario: Arketypiska beskrivningar av möjliga framtidsbilder skapad av mentala kartor eller modeller som speglar olika perspektiv på tidigare, nuvarande och framtida utveckling.

Styrmedel: Statlig intervention som skapar incitament för olika aktörer att vidta åtgärder.

Västerhavet: De marina områdena (Kattegatt och Skagerrak) utanför den svenska västkusten.

Åtgärd: Konkreta förändringar som leder till en effekt på målet.

1 Introduktion

1.1 Uppdrag och frågeställning

Människors aktiviteter påverkar miljön, och havsmiljön är inget undantag. Marina ekosystem har påverkats av t.ex. jakt och fiske, föroreningar, övergödning och fysiska ingrepp vid olika typer av exploateringar. Utöver sådana påverkansfaktorer sker också utsläpp av växthusgaser som orsakar förändringar av klimatet. Även klimatförändringarna påverkar den marina miljön. IPCC skriver t ex att klimatförändringarna kommer att leda till storskaliga förändringar i marin produktivitet, biodiversitet, artsammansättning och ekosystemstrukturer, samt att artrikedomen kommer att minska (Pörtner et al., 2014). Uppvärmningen kan också leda till förändringar av icke-biologiska faktorer såsom stratifiering och syrehalt i vattenmassan. Till detta kommer också att förhöjda koldioxidhalter i atmosfären leder till en försurning av havsvattnet, med möjliga konsekvenser för arter och ekosystem. Enkelt uttryckt kan en mängd olika belastnings- och påverkansfaktorer, ofta i ett komplext samspel, utmana de resurser som havet har att erbjuda.[1]

Miljömålsberedningen har i direktiv 2018:44 fått i uppdrag att ta fram en strategi för förstärkt åtgärdsarbete för bevarande och hållbart nyttjande av hav och marina resurser. Som underlag för arbetet med strategin behövs kunskap om befintlig forskning kring tillämpning av havsförvaltning och hur klimatförändringar påverkar haven. Miljömålsberedningen har med anledning av detta föreslagit Formas Miljöanalys att göra en sammanställning av befintlig forskningslitteratur inom nedanstående områden:

1. Effekter av klimatförändringar (uppvärmning, syrgasbrist, utsötning m.m.) på marina och kustnära ekosystem och biodiversitet som t.ex. effekter på artsammansättning och artutbredning, effekter på trofinivåer och ökad risk för invasiva arter m.m. I frågeställningen ligger även att inkludera om kunskapen genom befintlig övervakning och monitorering bedöms som tillräcklig för att göra prognoser för effekter av klimatförändringar på ekosystem och biodiversitet.
2. Effekter av havsförsurning i enlighet med frågan ovan.
3. Kunskap om havets och kustbiotopernas roll och omfattning som klimatreglerare och i synnerhet CO_2-sänka. Hur påverkas havets och marina ekosystems förmåga att fastlägga CO_2 av mänsklig påverkan, i synnerhet övergödning, fysisk påverkan och fiske? I den mån miljögifter och läkemedel bedöms relevant bör detta inkluderas. Finns det forskning och kunskap om effekter av kumulativ påverkan från flera påverkansfaktorer.
4. Kunskap om i vilken omfattning tillämpningen/anpassning av verktyg inom havsförvaltningen som t.ex. skyddade områden, havsplanering, fiskfredningsområden, MKB och tillståndsprövningar etc., kan utformas, för att bidra till att förstärka havets resiliens mot effekter

[1] Med påverkansfaktorer avses alla de faktorer som påverkar den marina miljön, medan belastningsfaktorer enbart avser de antropogena faktorerna. Exempelvis är klimatförändringar en påverkansfaktor och inte en belastningsfaktor eftersom den delvis orsakas av belastningsfaktorn växthusgasutsläpp. Klimatförändringar är med andra ord ett miljötillstånd vilket i sin tur kan påverka andra miljötillstånd (se figur 2).

från klimatförändringar och havsförsurning. Vilken kunskap finns om vilka åtgärder som är mest kostnadseffektiva för att upprätthålla havets resiliens?

5. Kunskap om hur klimatmodeller och prognoser har/kan användas eller tillämpas för att bidra till policyutveckling, förvaltningsstrukturer och beslutprocesser i havsmiljöförvaltningen.

1.2 Syfte och mål

Syftet med rapporten är att presentera en objektiv bild av kunskapsläget kring de fem områden som anges i föregående avsnitt. Ett av målen är att identifiera de forskningsfrågor som undersökts i stor utsträckning och där det finns ett brett vetenskapligt underlag. För vissa av dessa frågor försöker vi också att bedöma hur samstämmiga resultaten är mellan olika studier. Det går då att skilja mellan frågor där det råder relativt stor konsensus och frågor där en större osäkerhet råder trots att omfattande undersökningar har gjorts. Ett annat mål är att identifiera forskningsluckor, det vill säga frågor som undersökts endast i liten omfattning eller inte alls. En djupgående analys av om en identifierad forskningslucka också motsvarar ett forskningsbehov eller kunskapsbehov ligger dock utanför ramen för denna typ av litteratursammanställning, men viss vägledning kan ges med utgångspunkt från de behov som lyfts fram i forskningslitteraturen och andra rapporter.

1.3 Metod och begränsningar

De fem områden eller frågor vi belyser i den här rapporten är brett formulerade och rymmer många aspekter. Att sammanställa och sammanfatta forskningsresultaten på ett heltäckande sätt, med minimerad risk för att slutsatserna är baserade på ett snedvridet underlag, är ett omfattande vetenskapligt arbete som skulle behöva göras inom ramen för flera olika systematiska översikter[2]. Här har det inte funnits tid och resurser att genomföra sådana systematiska översikter, utan vi har valt att genomföra en enklare litteratursammanställning. Dock har vi använt ett systematiskt angreppssätt, och resultatet kan betraktas som en objektiv sondering av den terräng som forskningen rör sig i.

Litteratursammanställningen är begränsad till studier som hittats i Web of Science (https://clarivate.com/products/web-of-science/). För att vinna tid har sökningarna gjorts relativt målspecifika. Det innebär att en stor andel av sökträffarna var relevanta för frågorna men att vissa relevanta artiklar samtidigt kanske inte har fångats in. Ytterligare en begränsning är att vi i första hand har sökt efter studier med relevans för svenska förhållanden genom att lägga in sökkriterier som relaterar till Östersjön och Västerhavet (Kattegatt och Skagerrak).

För vissa av de begrepp som använts vid kodningen kan det inom forskningen förekomma mer än en definition. Vid kodningen utifrån enbart text i abstract har det inte varit möjligt att bedöma vilken definition på begreppet som avses i respektive artikel. Detta gäller i hög grad för resiliensbegreppet vilket inom forskningen har en mängd olika definitioner (O'Leary et al., 2017)

[2] En systematisk översikt är en form av litteraturöversikt som syftar till att på ett objektivt och transparent sätt sammanställa och sammanväga all tillgänglig forskning i en specifik fråga för att på så sätt kunna ge ett så rättvisande och välunderbyggt svar som möjligt. Systematiska översikter genomförs enligt strikta vetenskapliga metoder. Riktlinjer för utförandet har utvecklats inom bland annat medicin (https://www.cochrane.org/), samhällsvetenskap (https://campbellcollaboration.org/) och miljövetenskap (http://www.environmentalevidence.org/).

men kodningsbegrepp såsom ekosystemansats, styrmedel, åtgärder, kostnader, nyttor, kostnadseffektivitet förekommer olika definitioner. Det är dock i de flesta fall inte möjligt att enbart utifrån artiklarnas abstract avgöra vilken definition författarna tillskriver olika begrepp.

Eftersom vi inte har kunnat säkerställa att vi har tagit hänsyn till all tillgänglig forskning i specifika frågor kan vi inte dra några säkra slutsatser om resultaten i specifika frågor. Slutsatserna i denna rapport är därför mer övergripande och handlar i första hand om vilken forskning som bedrivits, vad forskarna är överens om, vilka frågor det råder större osäkerhet kring, och huruvida osäkerheterna beror på motstridiga resultat eller på att frågan undersökts i liten omfattning.

En utförligare metodbeskrivning finns i avsnittet 3 Metod för respektive frågeområde.

1.4 Rapportens disposition

Rapporten är disponerad enligt följande. I avsnitt 2 nedan ges definitionen på några av de centrala begrepp som förekommer i respektive frågeställning. Därefter, i avsnitt 3, görs en fördjupad utveckling av de olika frågorna vilket är nödvändigt för att ta fram en lämplig metod för att besvara dessa. Metoden för själva sökningen till litteratursammanställningen redovisas i avsnitt 4. Resultaten för respektive frågeställning presenteras i avsnitt 5, vilken även i mer detalj beskriver vad några av de erhållna artiklarna kommit fram till. En diskussion kring själva litteratursammanställningens begränsningar, kunskapsläget samt andra relevanta rapporter ges i avsnitt 6. Slutligen, i avsnitt 7, redovisas vilka slutsatser som tagits utifrån den genomförda litteratursammanställningen.

2 Centrala begrepp

I det här avsnittet definieras ett antal begrepp som är centrala för forskningen på området och hur dessa relaterar till förvaltningen. Medan det råder en enighet kring definitionen för vissa av dessa begrepp kan det för andra förekomma olika definitioner.

2.1 Resiliens

Havens resiliens definieras i tilläggsdirektivet till miljömålsberedningen (dir 2018:44) som deras motståndskraft och återhämtningsförmåga. Det är med andra ord ekosystemets resiliens som avses och inte resiliens av det socio-ekologiska systemet (för beskrivning av den senare och skillnaden mellan de två se Folke et al., 2002 samt Walker et al., 2004). Det finns dock inom forskningslitteraturen inte en överenskommen gemensam definition av resiliensbegreppet utan en mängd mer eller mindre liknande definitioner (O'Leary et al., 2017). Ett ekosystems motståndskraft och återhämtningsförmåga förekommer dock i merparten av dessa (visserligen uttryckt i olika termer). Ju lägre motståndet och återhämtningskraften är i ett marint ekosystem, desto sämre är dess resiliens mot olika typer av störningar/chocker. Ekosystem med svag motståndskraft men hög återhämtningsförmåga kan däremot betraktas som resilienta vilket även gäller för system med stark motståndskraft och svag återhämtningsförmåga (Oliver et al., 2015). Ett marint ekosystems resiliens mot klimatförändringarna kan ses som en kombination av motståndskraft mot alltmer frekventa och allvarliga störningar, kapacitet för återhämtning och självorganisation och förmåga att anpassa sig till nya förhållanden (Bernhardt & Leslie, 2013). O'Leary et al. (2017) anser att de tilltagande klimatförändringarnas effekter på det marina ekosystem och dess ekosystemtjänster kräver en ökad förståelse för de förutsättningar och processer som möjliggör resiliensen samt att åtgärder vidtas för att främja dessa. En annan fördel av marina ekosystem med hög resiliens är att förändringar inte är drastiska och därför lättare att förespå, viket är av extra betydelse för t.ex. fisket eftersom fiskmängden blir lättare att prediktera (Stenseth & Rouyer, 2008).

2.2 Åtgärder och styrmedel

Definitionen på åtgärder och styrmedel utgår i denna rapport från Naturvårdsverket (2012) i vilken ett styrmedel ger incitament till att begränsa eller öka användningen av en vara eller tjänst. En åtgärd är den handling som en aktör (företag eller en individ) genomför till följd av ett styrmedel. Exempel på åtgärder av betydelse på den marina miljön kan vara förbättrad rening av läkemedelsrester vid reningsverk, dubbla skrov på fartyg i syfte att minska risken för oljespill, minskat fiske, musselodlingar. Styrmedel kan utgöras av exempelvis skatter, regleringar eller information som staten använder för att skapa incitament till beslut om konkreta åtgärder eller beteendeförändringar. Som exempel kan man införa krav (styrmedel) på dubbla skrov (åtgärd) för all sjöfart i Östersjöområdet. Åtgärder är därmed de konkreta förändringar som leder till en påverkan på målet (t.ex. installerandet av förbättrad reningsteknologi i reningsverk). Staten kan i vissa fall själv genomföra åtgärder utan något behov av styrmedel (till exempel genom att inrätta marina naturreservat). Styrmedel har som syfte att skapa incitament för olika aktörer (företag, hushåll, individer) att vidta åtgärder eller förändra beteende på ett sätt som gynnar den marina

miljöns resiliens. Styrmedel kan rikta in sig på drivkrafter, aktiviteter, belastning, miljötillståndet eller själva effekten på välfärden (se figur 2).

Styrmedel delas vanligtvis upp i följande huvudkategorier:

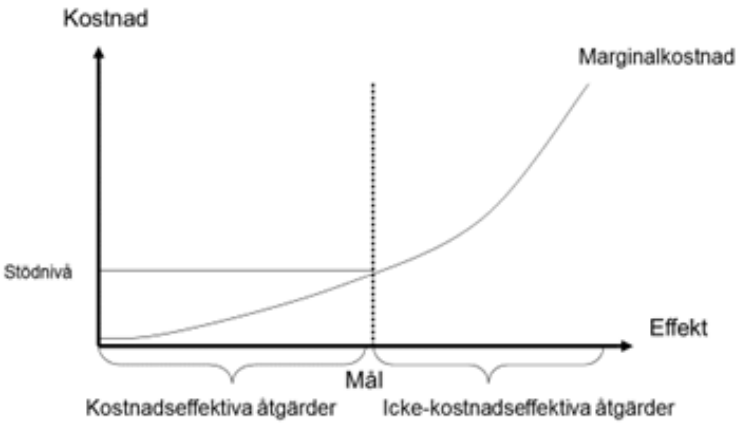
- Administrativa: reningskrav, förbud, teknologiska krav, tillståndsprövning, etc.
- Ekonomiska: skatter, subventioner, avgifter, handel med utsläppsrätter, pantsystem, etc.
- Informativa: utbildning, allmänna råd, informationskampanjer, etc.

Vilka typer av styrmedel (administrativa, ekonomiska eller informativa) som implementeras samt vad i problemkedjan det riktas mot (drivkrafter, aktiviteter, belastning, miljötillstånd eller välfärdseffekt) och på vilken geografisk skala (nationellt, regionalt eller internationellt) styrs i hög grad av belastningens och miljöproblemets karaktär men varierar även beroende på vilken sektor eller aktivitet som berörs. Administrativa styrmedel på nationell nivå tenderar att dominera för miljöproblem där kopplingen mellan aktivitet och belastning är tydlig och geografiskt begränsad (t.ex. fysisk påverkan). För sektorer och aktiviteter av internationell karaktär såsom sjöfart och marint fiske krävs det i större grad internationella eller regionala styrmedel (alternativt överenskommelser som leder till nationella styrmedel) för att minska belastningen.

I själva litteratursammanställningen som presenteras i avsnitt 5 har det i de flesta fall inte varit möjligt att enbart utifrån artiklarnas abstract avgöra vilken definition på åtgärder samt styrmedel som författarna använt. Det är ofta förekommande att åtgärder och styrmedel kan ha en vidare betydelse än vad Naturvårdsverkets definition innebär.

2.3 Kostnadseffektivitet

För kostnadseffektivitet finns en tydlig och inom nationalekonomin överenskommen definition. Enligt denna definition innebär kostnadseffektivitet att ett visst mål uppnås till lägsta möjliga kostnad för samhället, alternativt att största möjliga miljöeffekt nås för en given kostnad. Antag ett mål för resiliensåtgärder (vilket kräver att effekten av åtgärden på resiliens kan kvantifieras) som illustreras av den horisontella linjen i figur 1 nedan (x-axeln).



Figur 1 Kostnadseffektivitet

Den vertikala axeln illustrerar kostnaden. Marginalkostnadskurvan indikerar kostnaden för en ytterligare åtgärd och dess effekt på resiliensen. Initialt kan åtgärder genomföras vilka har låga kostnader men ju högre effekt man önskar uppnå desto dyrare kommer åtgärderna att bli. Endast de åtgärder som befinner sig till vänster om målet utgör per definition kostnadseffektiva åtgärder. Eftersom totalkostnaden representeras av ytan under marginalkostnadskurvan i figuren är det tydligt att genomförandet av de kostnadseffektiva åtgärderna når målet till lägsta möjliga kostnad.

Trots att det finns en vedertagen definition på kostnadseffektivitet förekommer det att begreppet används felaktigt (huvudsakligen i så kallad grålitteratur). Som framkommer senare i denna rapport är det för närvarande inte möjligt att kvantifiera resiliensen på ett sådant sätt som gör det möjligt att bedöma kostnadseffektiviteten av åtgärder riktade mot att förstärka den marina resiliens.

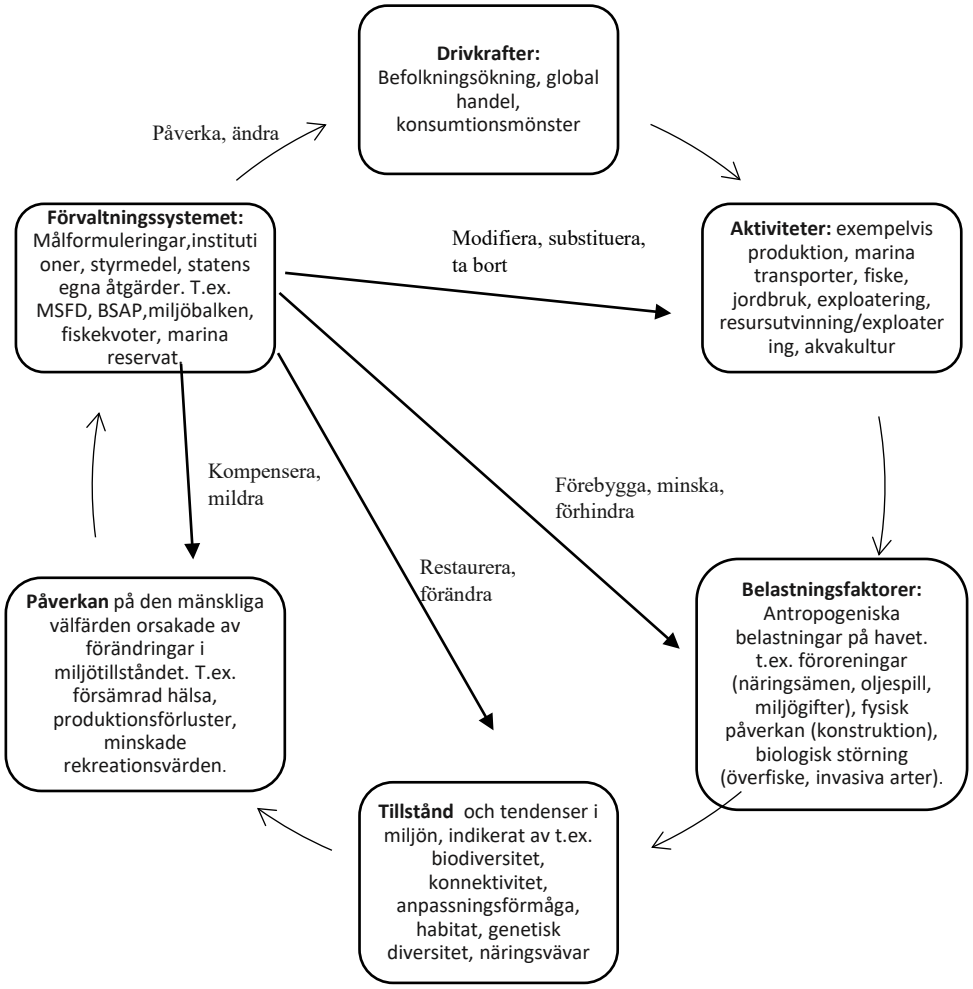
2.4 Modeller

Modeller kan definieras som kvalitativa eller kvantitativa beskrivningar av ett systems nyckelkomponenter och hur dessa förhåller sig till varandra (IPBES, 2016). Modeller har som mål att utifrån olika data beräkna förändringar i naturvetenskapliga och/eller socioekonomiska variabler inom en specifik händelsekedja. Till exempel används modeller för att beskriva hur jordbruksproduktionen påverkar belastningen av näringsämnen och hur denna leder till ökad övergödning vilket i sin tur leder till försämrat siktdjup i Östersjön. Modeller kan även användas för att göra prognoser eller utveckla scenarier.

Vad gäller klimatförändringars direkta och indirekta effekter på den marina miljön i Östersjön kombineras och används regionala klimatmodeller, atmosfäriska depositionsmodeller, ekosystemmodeller, oceanografiska modeller och även landytemodeller (Tedesco et al., 2016). Medan klimatförändringar är en output för klimatmodeller så kan de vara en input i andra modeller (såsom ekosystemmodeller, oceanografiska modeller, landytemodeller), vilket är fallet för de modeller som syftar till att beskriva hur den marina miljön påverkas av klimatförändringar. I vissa fall kan ett flertal modeller kopplas samman (t.ex. landbaserade avrinningsområdesmodeller och oceanografiska modeller) för att beskriva hur klimatförändringar direkt och indirekt påverkar den marina miljön (Meier et al., 2018).

Konceptuella modeller har som syfte att skapa en helhetsbild över en viss miljöfråga såsom t.ex. oljespill. Konceptuella modeller är grafiska representationer av orsak och effektsamband inom ett visst system, vilka tillför en förenklad översikt av komplexa processer (Fischenich, 2008).[3] Dessa kan användas för att kartlägga de bakomliggande drivkrafterna och aktiviteterna bakom en viss typ av miljöförsämring vilket är av vikt vid framtagandet av scenarier. Figur 2 utgör ett exempel på en konceptuell modell som illustrerar kopplingen mellan de aktiviteter som orsakar de olika belastningsfaktorerna samt deras påverkan på attribut av vikt för den marina resiliensen. Försämringar av den marina resiliensen leder i sin tur till påverkan på den människors välfärd i form av bland annat försämrade rekreationsmöjligheter (t.ex. p.g.a. algblomningar) och minskade intäkter från fiske.

[3] Konceptuella modeller används oftast inom miljöforskning (Fischenich, 2008), bedömning (Margoluis et al., 2009), utbildning (DEHP, 2012) och kommunikation (Heemskerk et al., 2003) och kan utföras på många olika sätt.



Figur 2 Konceptuell modell för marin resiliens

2.5 Prognoser

En prognos betecknar ett förutspått och högst sannolikt framtida händelseförlopp (Rotmans & van Asselt, 1997). Modeller kan användas för att ta fram prognoser över förändringar i specifika utfall kopplade till Östersjön. Exempelvis kan landbaserade modeller (vilka t.ex. inkorporerar markanvändning, ytvattenavrinning, nederbörd och retention) användas för att ta fram en prognos över den förväntade belastningen av näringsämnen till Östersjön. En prognos har oftast en kortare tidshorisont än ett scenario (jämför t.ex. väderprognoser med klimatscenarier). Vad som utgör en kort tidshorisont beror på trögheten i systemet samt närvaron av osäkerheter och kan därför variera från fall till fall. För övergödningens effekter på den marina miljön kanske tidshorisonter under 10 år utgör en kort sikt för vilket en prognos kan göras, men för tidshorisonter som överstiger 10 år kan scenarier vara mer lämpliga då de kan hantera osäkerheter om framtida utvecklingar av betydelse för problemet. Eftersom prognoser är kortsiktiga samt utgår från endast

en specifik utveckling eller framtid kan de huvudsakligen nyttjas i förvaltningspolitiken för att ta fram mål, styrmedel och åtgärder på kort sikt. Exempelvis används prognoser inom EU:s ramdirektiv för vatten för att bedöma åtgärdsbehovet (gapanalys) för att uppnå god ekologisk status (GES) inom den relevanta 6-årscykeln. Prognoser används i vissa fall även i det återkommande arbetet med den Fördjupade Utvärderingen (FU) i syfte att identifiera det framtida åtgärdsbehovet för att nå de svenska miljökvalitetsmålen.

2.6 Scenarier

Scenarier är arketypiska beskrivningar av möjliga framtidsbilder, skapad av mentala kartor eller modeller som speglar olika perspektiv på tidigare, nuvarande och framtida utveckling (Rotmans & van Asselt, 1997). De är varken förutsägelser eller prognoser, utan bygger på att en viss antagen händelseutveckling blir verklighet. En modellanalys av den effekt ett scenario har på en viss variabel eller system kallas ibland för projektion. Scenarier kan användas för att beskriva olika framtida utvecklingar baserat på förändringar av drivkrafter och aktiviteter samt exogena påverkansfaktorer. Det övergripande syftet med scenarier är att hantera olika typer av osäkerheter genom att beskriva framtider för olika utfall av dessa osäkerheter. Scenarier kan vara modellbaserade eller narrativa (vilka visserligen skulle kunna utgå från konceptuella modeller) och i vissa fall en kombination av båda (Alcamo, 2001). Utvecklingen av scenarier kan även bidra med att identifiera olika signaler för att man är på väg in i ett visst framtida utfall. Scenarier kan i havsförvaltningen användas för att identifiera robusta åtgärder, det vill säga vilka åtgärder som har önskad effekt oavsett vilket scenario som realiseras i slutändan.

Studier som utvecklar scenarier med hjälp av modeller har generellt en högre tillförlitlighet om en grupp av flera olika modeller har undersökts (en s.k. ensemble av modeller), särskilt i de fall då effekter av olika scenarier jämförs med varandra. I de fall några enstaka körningar av en enda modell används för jämförelse mellan scenarier finns en betydande risk att den variabilitet som redovisas inte kan isoleras till scenarierna, utan istället åtminstone delvis har med intern variabilitet eller osäkerhet i modellen att göra (Meier et al., 2018). En jämförelse av hur olika källor till osäkerhet påverkar modellprojektioner finns i t.ex. Hawkins & Sutton (2011).

3 Utveckling av frågeställningar

För att kunna svara på frågor på ett meningsfullt sätt är det viktigt att veta vad som verkligen menas med frågorna. I det här avsnittet kommer vi därför att utveckla de frågor som ställs i avsnitt 1.1 något. På grund av karaktären på frågorna 4 och 5 kommer dessa att behöva utvecklas mer än vad som är fallet för de tre första frågorna. Speciellt fråga 4 behöver delas upp för litteratursammanställning för att göra det möjligt att få fram information från forskningen kring kostnadseffektiva åtgärder för att upprätthålla resiliens. I avsnittet nedan repeterar vi frågorna och diskuterar under varje fråga de aspekter för vilka vi har sett behov av förtydliganden.

> ***Fråga 1.*** *Effekter av klimatförändringar (uppvärmning, syrgasbrist, utsötning m.m.) på marina och kustnära ekosystem och biologisk mångfald som t.ex. effekter på artsammansättning och artutbredning, effekter på trofinivåer och ökad risk för invasiva arter m.m. I frågeställningen ligger även att inkludera om kunskapen genom befintlig övervakning och monitorering bedöms som tillräcklig för att göra prognoser för effekter av klimatförändringar på ekosystem och biologisk mångfald.*
>
> ***Fråga 2.*** *Effekter av havsförsurning i enlighet med frågan ovan.*
>
> ***Fråga 3.*** *Kunskap om havets och kustbiotopernas roll och omfattning som klimatreglerare och i synnerhet CO2-sänka. Hur påverkas havets och marina ekosystems förmåga att fastlägga CO2 av mänsklig påverkan, i synnerhet övergödning, fysisk påverkan och fiske? I den mån miljögifter och läkemedel bedöms relevant bör detta inkluderas. Finns det forskning och kunskap om effekter av kumulativ påverkan från flera påverkansfaktorer.*

Frågorna inom frågeområde 1–3 handlar i huvudsak om effekter av olika påverkansfaktorer på olika subjekt eller populationer. Den typen av frågor brukar kräva att åtminstone tre delar av frågan tydligt definieras för att den ska förstås på ett entydigt sätt. De tre delarna är A) Populationen, dvs. vad eller vilka det är som påverkas B) Exponeringen, dvs. vilken påverkansfaktor som avses och hur exponeringen för den sker C) Utfallsmåttet, dvs. vilken effekt som avses och med vilket eller vilka mått effekten kan mätas. Dessutom behöver man ofta definiera en fjärde del av frågan, nämligen D) Jämförelsen, dvs. vad effekten av en viss exponering ska jämföras med. Annars riskerar man lätt att utvärdera effekter på ett sätt som inte är likvärdigt.

Frågeställningarna inom område 1–3 rymmer en mångfald av populationer, exponeringar och utfallsmått. För att strukturera och få en överblick över tänkbara forskningsfrågor har vi valt att dela in dem dels efter påverkansfaktor, dels efter typ av utfall. Frågorna kan då placeras in i en tvådimensionell matris där påverkansfaktorerna anges i kolumner och utfallen anges radvis (se Tabell 1). Varje ruta i matrisen representerar en fråga av typen ”Hur påverkas utfallet Y av exponeringen X?”. De påverkansfaktorer vi inkluderar i denna rapport är dels sådana som är ett resultat av klimatförändringar (uppvärmning, utsötning, lägre syrehalter, havsnivåförändringar), dels sådana som är ett resultat av ökade koldioxidhalter i atmosfären (upptag av koldioxid, försurning). Eftersom uppdraget kan liknas vid en kartläggning av kunskapsläget har utfallstyperna på förhand inte definierats noggrannare än att de ska vara relaterade till den marina miljön. Istället har vi fyllt på efterhand beroende på vad vi hittat i litteraturen.

Effekterna i matrisens rutor kan gå åt båda håll, dvs. det går även att placera in studier av hur till exempel eutrofiering, fysisk påverkan och fiske påverkar haven som klimatreglerare.

Tabell 1. Exempel på matris för att överblicka olika forskningsfrågor. De studerade påverkansfaktorerna anges i kolumnerna och de studerade utfallen anges radvis. Varje ruta representerar en fråga av typen ”Hur påverkas utfallet Y av påverkansfaktor X?”. Exempelvis representerar rutan markerad med X forskning om hur försurning påverkar olika organismers funktioner. Observera dock att populationen inte är definierad i denna matris. Forskningen inom rutan kan därför handla om allt från cyanobakterier till sälar, eller hela ekosystemet. Utfallsmåttet är heller inte närmare definierat, det kan handla om allt från halter av olika signalsubstanser till beteendestörningar till överlevnad.

	Upp-värmning	Upptag av CO2	För-surning	Havsnivå-förändring	Utsötning	Syrehalt
Temperaturförändring						
pH-förändring						
Havsnivåförändringar						
Vattnets salinitet						
Vattnets syrehalt						
Påverkan på kolcykeln						
Funktioner hos organismer			X			
Produktivitet						
Artsammansättning						
Artutbredning						
Väder/klimat						
Förekomst av invasiva arter						
Väderförhållanden/klimat						
Oceanografi						
Eutrofiering						
Algblomning						
Nedbrytning av org. mtrl						
Biogeokemiska cykler						
Kusterosion (turbiditet)						
Fiske och akvakultur						

I fråga 1 ingår också en delfråga om huruvida kunskapen från övervakning är tillräcklig för prognoser av klimatförändringarnas effekter. Den frågan är svår att besvara genom en systematisk litteratursammanställning, eftersom den sällan står i fokus för specifika forskningsundersökningar. Vi har därför inte utformat undersökningen av forskningslitteraturen särskilt efter denna fråga. Däremot har vi noterat rapporter som har relevans för frågan och utifrån dessa försökt sammanställa det som sägs om huruvida övervakningen är tillräcklig.

Med ”övervakning” menas i denna rapport en systematisk insamling av observerade data som beskriver tillståndet av olika parametrar i miljön.

Fråga 4. *Kunskap om i vilken omfattning tillämpningen/anpassning av verktyg (styrmedel) inom havsförvaltningen som t.ex. skyddade områden, havsplanering, fiskfredningsområden, MKB och tillståndsprövningar etc. kan utformas, för att bidra till att förstärka havets resiliens mot effekter från klimatförändringar och havsförsurning. Vilken kunskap finns om vilka åtgärder som är mest kostnadseffektiva för att upprätthålla havets resiliens?*

Det finns knappast någon forskning som identifierat de kostnadseffektiva åtgärderna eller styrmedlen för att bevara den marina resiliensen, vilket kan ha flera möjliga förklaringar men troligtvis främst förklaras av resiliensbegreppet i sig. Dels är det nödvändigt att resiliens kan konkretiseras och kvantifieras på något sätt för att åtgärders kostnadseffektivitet ska kunna bedömas (se figur 1). Det vill säga, hur mycket resiliens eftersträvas? Och i vilka enheter (t.ex. hektar, ton, koncentration, yta, biomassa) kan detta mätas? Därefter behöver effekten på denna resiliens kvantifieras för varje åtgärd, det vill säga vilken effekt har åtgärden på den mätbara enheten. Enbart om detta är möjligt går det att bedöma vilka åtgärder som är mest kostnadseffektiva. Eftersom det inte i dagsläget är möjligt att kvantifiera resiliens är det därför inte möjligt att identifiera åtgärdernas effekt på resiliensen, och därmed inte heller bedöma vilka åtgärder som är kostnadseffektiva.

För att kunna bedöma hur styrmedel och verktyg kan utformas för att förstärka havets resiliens mot effekter från klimatförändringar och havsförsurning behöver man därför dels identifiera vilka specifika biologiska och fysiska attribut i havsmiljön (t.ex. habitat, biodiversitet, konnektivitet) som är av betydelse för denna resiliens och därefter bedöma vilka påverkansfaktorer som påverkar dessa attribut negativt. Det kan i vissa fall även vara möjligt att identifiera åtgärder och styrmedel vilka har en direkt positiv effekt på attributen (t.ex. kan skyddade områden ha positiv effekt på habitat). För att kunna fastställa vilka åtgärder som kan minska de för resiliensen relevanta belastningsfaktorerna, behöver de bakomliggande aktiviteterna och drivkrafterna bakom respektive belastningsfaktor identifieras (se figur 2). För de flesta belastningsfaktorer finns stor kunskap om de aktiveter som ger upphov till dessa, såsom sjöfart, fiske, jordbruk, avloppvattenhantering, industrier, konsumtion (av t.ex. läkemedel). Först efter att man identifierat belastningsfaktorerna kan specifika åtgärder och styrmedel som minskar dessa identifieras. Information om åtgärdernas kostnader samt effekter på attributen av de olika åtgärderna gör det möjligt att uttala sig om kostnadseffektiviteten av att minska en specifik belastning. Detta innebär dock att det inte går att jämföra kostnadseffektiviteten av åtgärder över olika belastningsfaktorer. Exempelvis kan inte kostnaden av att minska kvävebelastningen till havet från enskilda avlopp med ett kg (dess marginalkostnad) jämföras med kostnaden av att minska oljeutsläppen från fartygsolyckor med ett kg. Det går med andra ord inte att uttala sig vilken av dessa två åtgärder som är mer kostnadseffektiv än den andra vad gäller att upprätthålla den marina resiliensen.

Fråga 5. *Kunskap om hur klimatmodeller och prognoser eller scenarier har/kan användas eller tillämpas för att bidra till policyutveckling, förvaltningsstrukturer och beslutprocesser i havsmiljöförvaltningen.*

Inom EU finns en rad direktiv av betydelse för havsmiljöförvaltningen såsom Havsmiljödirektivet (2008/56/EG), Vattendirektivet (2000/60/EG), direktivet om ett upprättande av en ram för havsplanering (2014/89/EG), direktivet om bevarande av livsmiljöer samt vilda djur och växter

(1992/43/EG), EU-direktiv (91/271/EEG) om rening av avloppsvatten från tätbebyggelse. Samtliga EU-direktiv är införlivade i svensk lagstiftning. EU:s gemensamma fiskepolitik (CFP) är av avgörande betydelse för hur fisket bedrivs i våra marina områden. Dessutom existerar en mängd EU-förordningar som är av betydelse för olika belastningar till den marina miljön såsom EU-förordningen (1380/2013/EG) om den gemensamma fiskepolitiken, EU-förordning (1907/2006) om registrering, utvärdering, godkännande och begränsning av kemikalier (REACH), EU-förordning (530/2012/EG) om ett påskyndat införande av krav på dubbelskrov eller likvärdig konstruktion för oljetankfartyg med enkelskrov, EU-förordning (708/2007/EG) om användning av främmande och lokalt frånvarande arter i vattenbruk samt EU-förordning (1143/2014/EG) om förebyggande och hantering av introduktion och spridning av invasiva främmande arter. Förutom dessa direktiv och förordningar förekommer det även nationella och internationella samt andra regionala förvaltningsstrukturer och beslutsprocesser vilka har betydelse för havsmiljöförvaltningarna (t.ex. flera av de svenska miljökvalitetsmålen, Helcoms BSAP, IPCC, ICES).

Det finns fler olika sätt som klimatmodeller, prognoser och scenarier kan användas för att bidra till policyutveckling, förvaltningsstrukturer och beslutsprocesser i havsmiljöförvaltningen. Inom den nationella tillämpningen av EU:s Vattendirektiv (vattenförvaltningen) används prognoser som underlag för att bedöma behovet av åtgärder för att uppnå god ekologisk status (GES) för olika vattenförekomster inom en viss tidsperiod. Eftersom klimatförändringens effekter på den marina miljön kommer att påverka systemet långt in i framtiden är scenarier mer lämpade än prognoser för att bidra till policyutvecklingen av förvaltningsstrukturer och beslutprocesser i de delar av havsmiljöförvaltningen som påverkas av klimatet. Detta eftersom osäkerheter kring effekterna på den marina miljön av klimatförändringar ökar med tidshorisonten.

I framtagandet av olika framtida scenarier är det viktigt att identifiera och utgå från de drivkrafter och aktiviteter som har stor påverkan på det marina tillståndet och för vilka framtiden kännetecknas av stora osäkerheter. Förutom renodlade klimatscenarier kan därför även scenarier för drivkrafter och aktiviteter såsom konsumtionsmönster, global handel, sjöfart, jordbruk, fiske, politisk utveckling vara av intresse (t.ex. Agrimonde, 2009; WWF 2012; Öborn et al., 2011). Det är även viktigt att beakta hur olika drivkrafter och aktiviteter interagerar vid utvecklingen av olika scenarier. En vanlig metod för att koppla ihop olika scenarier är att utveckla modellscenarier vilka utgår från gemensamma narrativa scenarier (storylines). Till exempel kan de av IPCC utvecklade narrativa scenarierna för klimatet användas som utgångspunkt för att koppla ihop olika typer av modellscenarier. Scenarier kan även kopplas ihop genom att det som är output från vissa scenarier blir input till andra. Exempelvis kan scenarier vilka som output har olika typer av markanvändning användas som input till scenarier vars output är belastningen av näringsämnen till marina områden.

Förvaltningspolitiken (och därmed modeller och scenarier) behöver hantera närvaron av s.k. rörliga mål (HaV, 2013b; Scharin et al., 2016).[4] Målen, och därmed de åtgärder och styrmedel som krävs för att uppnå dessa, kan ändras över tiden på grund av:

[4] Risken för rörliga mål har att gör med hur miljömålen definierats och ifall de kvantifieras. BSAP:s kvoter för näringsbelastning utgör ett tydligt rörligt mål medan miljömålet ”Hav i balans” inte kan vara rörligt.

- En snabbare ökning av exogena drivkrafter/faktorer än vad som förväntats (t.ex. klimatförändringar) (Niiranen et al., 2013).
- Interaktioner som inte beaktas av den rådande miljöpolitiken eller för vilka förståelsen är begränsad (t.ex. främmande arters effekt på övergödningen).
- Negativa återkopplingsmekanismer som accelererar ovälkomna förändringar samt regimskiften[5] och tröskeleffekter[6] (se Walker & Meyers, 2004; Österblom et al., 2007; Lotze, 2011; Lontzek et al., 2015 för exempel på tröskeleffekter).[7]

Enligt Bernhardt och Leslie (2013) kommer klimatförändringar leda till en ökad risk för regimskiften. Som ett exempel på rörliga mål pekar Meier et al. (2012a) på att även de ambitiösa näringsreduceringsmålen för Östersjön kanske inte är tillräckliga för att uppnå det önskade miljötillståndet på grund av klimatförändringens effekter på såväl belastningen (t.ex. näringsämnesbelastning, främmande arter) som Östersjöns förmåga att hantera densamma. Inom Helcoms arbete med Baltic Sea Action Plan reviderades därför belastningskvoterna för kväve och fosfor 2013 utifrån nya kunskaper.

Om drivkrafterna och aktiviteterna intensifierats eller om miljöeffekten kännetecknas av återkopplingsmekanismer eller tröskeleffekter kan man utifrån indikatorerna dra den felaktiga slutsatsen att ett visst styrmedel varit verkningslöst även om genomförda åtgärder haft effekt på belastningen. Till exempel innebär en framtida ökning av drivkrafterna och därmed aktiviteterna att belastningen på miljön ökar (allt annat lika) vilket leder till ett försämrat miljötillstånd givet en viss mängd styrmedel.

Beroende på hur berörda de marina miljömålen inom förvaltningspolitiken är formulerade kan förändringar av drivkrafter innebära behov av att revidera målen. Exempelvis kan ett varmare klimat, förutom förändrad ytvattenavrinning, även innebära ökad övergödning (och därmed ökad sannolikhet för algblomningar), givet belastningsnivån, eller att havsvattnets temperaturökning öppnar för introduktionen av fler främmande arter. Indirekt och på längre sikt påverkar även klimatförändringar de bakomliggande drivkrafterna/aktiviteterna och belastningar (t.ex. ökad efterfrågan på jordbruksprodukter, förändrad markanvändning).[8]

Scenarier kan i viss mån (bl.a. beroende på kunskapsläget vad gäller t.ex. närvaron av tröskeleffekter samt modellernas förmåga att inkludera denna kunskap) hantera återkopplingsmekanismer, tröskelvärden och tidsfördröjningar vilket kan ha stor betydelse för policybeslut (se exempel Gustafsson et al., 2012). Hur förvaltningsstrukturer förmår hantera rörliga mål är av extra stor vikt i ett klimat som är i förändring (Reusch et al., 2018). Även om sannolikheten för ett regimskifte inte kan fastställas kan man genom ett scenario beskriva hur det skulle kunna påverka miljötillståndet. Risken för att ett ekosystem (såsom Östersjön) genomgår ett

[5] Det vill säga en förändring i ett ekosystems tillstånd från en regim eller jämvikt till en annan.
[6] Den punkt där en relativt liten förändring av påverkansfaktorerna orsakar en snabb förändring i ett ekosystem.
7 Återkopplingsmekanismer förekommer när effekten av en viss förändring i sin tur påverkar den ursprungliga förändringen genom att förstärka den (positiv feedback) eller förminska den (negativ feedback). Ett exempel av positiv feedback i klimatsammanhang är de ökade utsläpp av växthusgaser som jordens uppvärmning leder till när permafrost tinar och frigör lagrad metan som leder till ännu mer uppvärmning.

[8] För merparten av de scenarier som tagits fram med koppling till Östersjöns miljötillstånd ingick klimatförändringar (HaV, 2013b).

regimskifte ökar när ekosystemets resiliens minskar på grund av mänskliga aktiviteter (Folke et al., 2004).[9] Osäkerheter eller okunskap om återkopplingsmekanismer och tröskeleffekter innebär begräsningar för modellbaserade scenarier (eftersom man inte förstår eller har kunskap om dessa). Under sådana förutsättningar kan narrativa scenarier vara användbara eftersom de inte är modellbaserade.

9 Förutom naturvetenskapliga ickelinjära effekter/tröskeleffekter kan det även förekomma politiska, ekonomiska samt sociala tröskeleffekter såväl inom systemet som ska förvaltas som förvaltningssystemet (Walker & Meyers, 2004; Lade et al., 2013).

4 Metod

Sökningar efter vetenskaplig litteratur har gjorts i Web of Science (https://clarivate.com/products/web-of-science/)[10]. Web of Science är en stor och bred plattform och bör omfatta ett representativt urval av den publicerade vetenskapliga forskningen inom klimatförändringar och havsmiljö.

Fråga 1-3

För att fånga in den litteratur som är relevant för frågeområde 1–3 har vi använt nedanstående söksträng.

> (sea OR ocean OR marine OR coast*) AND (climate) AND (warm* OR acidification OR CO2 OR "carbon dioxide" OR salinity OR freshening OR oxygen OR pressure* OR stressor) AND (baltic OR swed* OR skagerrak OR kattegat)

Sökströngen består av olika block med synonymer eller alternativa sökord inom varje block. Det första blocket anger att artiklarna ska handla om havsmiljö, det andra att de måste vara relaterade till klimat, det tredje att de ska handla om någon av de påverkansfaktorer som förhöjda koldioxidhalter eller klimatförändringar leder till. Det fjärde blocket, som anger geografiskt område, har vi lagt till för att begränsa sökträffarna till studier som är relevanta för Sverige eller svenska förhållanden. Asterisken (*) i slutet av vissa ord är ett så kallat wild card och kan representera valfritt antal tecken. Exempelvis kan coast* betyda både coast, coasts och coastal.

Den använda sökströngen är relativt specifik. Det innebär att en stor andel av sökträffarna är relevanta för frågeställningarna inom område 1–3. Samtidigt finns det en risk att många artiklar som skulle kunna vara relevanta inte hittas. En viktig begränsning är den påverkan på Östersjön som utgår från förändrade aktiviteter på land. Landbaserade aktiviteter och deras förändringar har avgörande effekter på haven, men många studier av dessa uttrycker inte specifikt en nedströms påverkan i titel eller abstract, och det är därför troligt att de inte fångats in i denna sökning. Vi gör alltså inte anspråk på att sökningarna här är heltäckande, dels eftersom vi bara sökt i en databas, dels på grund av sökströngens utformning.

Sökningen gav 1190 träffar varav 603 exkluderades efter genomläsning av titel och abstract (sammanfattning). I den här undersökningen har vi inte tagit hänsyn till om studierna har inkluderat någon relevant jämförelse, eftersom studierna rör så pass skilda områden att det vore mycket tidskrävande att precisera det stora antal relevanta jämförelser som skulle behöva definieras.

Vid genomläsning av titel och abstract kodades artiklarna med avseende på vilken påverkansfaktor och typ av utfall som studien undersökt. Samma artikel kan ha kodats med multipla påverkansfaktorer och utfallstyper. Därefter delades studierna in i grupper där studierna i varje

[10] Web of Science är en plattform som innehåller flera databaser, och vilka databaser som ingår beror på vilken prenumeration man har. I det här fallet har vi använt Web of Science Core Collection.

grupp hade studerat samma påverkansverkansfaktor och samma typ av utfall. Sedan gjordes en sammanställning och sammanfattning av studierna i de viktigaste grupperna.

Utöver vetenskaplig litteratur har vi också i viss utsträckning studerat icke vetenskapligt granskad litteratur, så kallad grå litteratur. Inga systematiska sökningar efter grå litteratur har dock genomförts, utan ett fåtal rapporter från för ämnet centrala organisationer har studerats, och översiktliga sökningar har gjorts i Google Scholar.

I rapporten förekommer också referenser till vetenskapliga artiklar som inte påträffats genom den systematiska sökningen, utan identifierats från referenser i andra källor eller i diskussioner med sakkunniga på området. Dessa artiklar är dock inte medräknade i den kvantitativa sammanställningen av forskningen.

Fråga 4

Det är i ett första steg nödvändigt att identifiera de marina attribut som är av betydelse för den marina resiliensen mot klimatförändringar och havsförsurning. Det första steget blir därmed att hitta forskning som fokuserar på att identifiera de funktioner, processer och strukturer i marina miljöer som stärker dess resiliens med avseende på störningar kopplade till klimatförändringar och försurning. För att fånga in den litteratur som är relevant för att bedöma vilka attribut som är av relevans för den marina resiliensen samt vilka belastningar som påverkar dessa har vi använt nedanstående söksträng.

(TS=((sea OR ocean OR marine) AND (restor* OR recov* OR resist* OR re-creat* OR rehabilitat OR persist*) AND (resilienc* OR "ecological integrity")) NOT TI=(coral))

Söksträngen består av olika block med synonymer eller alternativa sökord inom varje block. Det första blocket anger att artiklarna ska handla om havsmiljö, det andra att de måste vara relaterade till någon av de faktorer som används för att definiera resiliens, det vill säga motståndskraft (resistance, persistance) och återhämtningsförmåga (recovery, re-creation, restoration, rehabilitation) det tredje att det ska handla om resiliens (som i vissa fall benämns ekologisk integritet). Slutligen har studier vilka adresserar korallrev uteslutits (NOT TI = (Coral)), vilket gjordes eftersom en snabb genomgång av en tidigare sökning ledde till att en stor andel av erhållna artiklar adresserade resiliens i tropiska korallrev, något som vi bedömde vara irrelevanta för Östersjöns och Västerhavets del. Vi har inte begränsat urvalet till artiklar som inkluderar klimateffekter och försurning av den anledningen att resiliens ger ett övergripande skydd till det marina ekosystemet oavsett typ av störningar. Vi har i denna sökning valt att inte begränsa sökningen geografiskt eftersom vi bedömt det som att vissa attribut av betydelse för resiliensen kan anses vara generella för marina områden. Dessutom skulle en begränsning till Östersjön och Västerhavet ge ett begränsat antal träffar i sökningen.

Sökningen gav 1024 träffar varav 602 (59%) artiklar bedömdes som relevanta efter genomläsning av titel och abstract. Orsaken till att artiklar exkluderas kunde vara att de inte innehöll relevanta resilienstermer, berörde ekosystem som inte är av relevans för Östersjön och Västerhavet (t.ex. korallrev), arter som inte är av relevans (t.ex. papegojfiskar) eller påverkansfaktorer som inte är av relevans (t.ex. oljeplattformar, tropiska cykloner). Detta innebär att 422 artiklar bedömdes relevanta vad gäller marina områdens resiliens gentemot olika störningar.

Vid genomläsning av titel och abstract kodades artiklarna med avseende på vilket resiliensattribut som påverkades av vilken påverkansfaktor. Många artiklar inkluderade flera påverkansfaktorer (t.ex. klimatförändring, övergödning, fiske) vilka kunde påverka ett eller flera attribut (habitat, biodiversitet, konnektivitet, genetisk diversitet, näringsväv).

För att i nästa steg bedöma vilken kunskap det finns vad gäller kostnadseffektiva åtgärder och styrmedel för att förstärka resiliensen genomfördes en ytterligare sökning. Följande söksträng användes för att identifiera relevanta artiklar inom området.

("baltic sea" OR "north sea" OR skagerrak OR kattegat OR bothnian OR "gulf of Finland" OR "danish straits" OR "gulf of Riga" OR "baltic proper") AND (cost* OR "cost-effective*").

Det första blocket anger att artiklarna ska beröra Östersjön eller Nordsjön eller någon av de relevanta marina områdena i dessa, det andra att de måste vara relaterade till kostnads- eller kostnadseffektivitetsbedömningar. Sökningen var därmed rätt bred i det att den inte gjorde några avgränsningar med avseende på vilket område som kostnadsbedömningarna skulle göras. Denna sökning resulterade i 1341 artiklar varav enbart 107 (8%) stycken bedömdes som relevanta. Vid genomläsning av titel och abstract kodades artiklarna med avseende på vilken påverkansfaktor och huruvida det gjords en kostnadseffektivitetsbedömning eller enbart en kostnadsbedömning av åtgärder.

Fråga 5

För att fånga in den litteratur som är relevant för fråga 5 har vi använt nedanstående söksträng.

Söksträng: ("north sea" OR "baltic sea" OR skagerrak OR kattegat) AND (model* OR scenari* OR progno* OR projection* OR narrativ* OR storyline*) AND (manag* OR govern* OR Policy OR policie* OR stewardship* OR decision* OR adapt* OR MSFD OR MSP OR helcom OR BSAP OR WFD)

Det första blocket anger att artiklarna ska beröra Östersjön eller Nordsjön eller någon av de relevanta marina områdena i dessa, det andra att modeller, scenarier eller någon typ av prognos måste ingå. Det tredje blocket syftar till att fånga artiklar vilka berör något inom förvaltningsstrukturen (såsom mål, styrmedel eller specifika direktiv och institutioner) eller beslutsprocesser.

Sökningen genomfördes liksom tidigare i Web of Science, vilket genererade 2323 vetenskapliga publikationer (artiklar och böcker). Efter en genomgång av titel och abstract bedömdes 757 (33%) av dessa artiklar som relevanta för frågeställningen. De övriga 1561 artiklarna exkluderades av ett antal olika skäl (t.ex. fel population, fel utfall, översikter). Samtliga 757 utvalda artiklar inkluderade någon form av modell som användes för att adressera någon form av miljöproblematik i det relevanta marina området (Östersjön eller delar av Östersjön samt relevanta delar av Nordsjön). Vid genomläsning av titel och abstract kodades artiklarna med avseende på inom vilket eller vilka områden modellen berörde (klimat, övergödning, fiske, oljespill etc.) samt ifall artikeln inkluderade prognoser eller scenarier och huruvida förvaltning nämndes generellt eller specifikt i form av mål, åtgärder och styrmedel. Det kodades även ifall det i abstract nämndes någon form av ekonomisk bedömning eller ekosystemansatsen.

5 Resultat

5.1 Översikt över frågeområde 1–3

Sökningarna efter artiklar som är relevanta för frågeområde 1–3 gav 1190 sökträffar. Vid genomläsning av titel och sammanfattning bedömdes 587 artiklar (49%) av dem vara relevanta. Dessa artiklar kodades med avseende på vilken påverkansfaktor och utfallstyp de behandlar. I Tabell 2 visas en tvådimensionell matris med påverkansfaktorer i kolumner och utfallstyper i rader. I varje ruta anges antalet artiklar som beskriver effekter av respektive påverkansfaktor på respektive utfallstyp. En och samma artikel kan beskriva effekter av flera olika påverkansfaktorer på flera olika utfallstyper.

	Påverkansfaktor					
Utfallstyp	Uppvärmning	Upptag av CO_2	Försurning	Havsnivå-förändring	Utsötning	Syrehalt
Vattentemperatur	67	1	2	6	19	2
pH	6	3	6	0	5	2
Havsnivå	16	0	0	14	2	0
Salinitet	43	1	1	10	32	3
Syrehalt	42	2	4	8	14	12
Påverkan på kolcykeln	11	6	4	2	5	2
Funktioner hos organismer	96	19	24	0	51	11
Produktivitet	46	8	7	1	15	4
Artsammansättning	103	7	6	0	54	16
Artutbredning	36	0	0	0	26	5
Väder/klimat	41	0	0	2	2	0
Avrinning	7	0	0	0	0	0
Oceanografi	15	0	0	1	4	0
Eutrofiering	17	0	1	1	4	1
Algblomning	22	1	2	0	2	1
Nedbrytning av org. mtrl	8	2	1	1	3	3
Biogeokemiska cykler	18	1	2	2	6	4
Kusterosion (turbiditet)	1	0	0	2	0	0
Fiske och akvakultur	17	0	1	0	6	2

Tabell 2. Tvådimensionell matris (heat map) som visar antalet artiklar för varje fråga av typen ”Vilken effekt har påverkansfaktor X på utfallstyp Y?”

Den mest studerade påverkansfaktorn är uppvärmning. Här ska dock poängteras att det inte bara är specifikt uppvärmning av havsvattnet som räknas in i den kategorin, utan även ett varmare klimat generellt. Exempelvis beskriver 44 artiklar hur saliniteten påverkas av uppvärmningen. I det fallet är det inte uppvärmningen av havsvattnet som i sig påverkar saliniteten. Mekanismen är istället indirekt, genom t.ex. en ökad nederbörd och avrinning från land, vilket i sin tur är ett resultat av ett varmare klimat. Den vanligast studerade utfallstypen (både i relation till uppvärmning och totalt) är artsammansättning följt av funktioner hos organismer.

Den näst mest studerade påverkansfaktorn är utsötning, och även här är det artsammansättning och funktioner hos organismer som är de mest studerade utfallstyperna. Effekter av koldioxidupptag, försurning och syrehalter har studerats i mindre omfattning. För koldioxidupptag och försurning är det funktioner hos organismer som har studerats mest.

I avsnitt 5.2–5.5 redogörs närmare för studierna inom frågeområde 1-3 och deras resultat.

5.2 Effekter av klimatförändringar på marina och kustnära ekosystem

5.2.1 Effekter av uppvärmning av havsvattnet

I det här avsnittet sammanställer vi alla studier vi funnit som på något sätt undersökt konsekvenser av global uppvärmning. De studier som ingår har alltså inte alltid specifikt undersökt uppvärmning av havsvattnet som isolerad påverkansfaktor, utan kan också ha undersökt global uppvärmning som övergripande drivkraft.

Uppvärmning av havsvattnet påverkar marina och kustnära ekosystem och biologisk mångfald på en rad sätt. Frågan är relativt väl studerad både på global skala och för Östersjön, jämfört med andra påverkansmekanismer (t.ex. försurning, utsötning och höjda havsnivåer). Trots det är i många fall de relativa bidragen till observerade förändringar från direkta effekter i fysiologi och andra påverkansvägar inte kartlagda (Laffoley & Baxter, 2016).

Organismer är anpassade till olika temperaturfönster och deras utbredningsområde kan därför påverkas av ändrade temperaturförhållanden i miljön, beroende på deras toleransnivåer för olika temperaturintervall. I IPCC:s sammanfattning om haven nämns att kunskapen om de mekanismer som styr organismers funktioner i förhållande till temperatur, samt vilka gränsvärden som kan tolereras, är som mest utvecklad för djur men mindre utforskad för andra organismer (Pörtner et al., 2014). Även om medelvärden för temperatur oftast används för att studera hur organismer svarar på temperaturförändringar styrs effekter oftare av temperaturextremer (Pörtner et al., 2014).

Både lägre och högre trofinivåer kommer att påverkas av varmare vatten, direkt och genom interaktioner mellan trofinivåer. Globalt beräknas nettoprimärproduktionen (NPP) minska, men vid högre latituder beräknas den generellt öka, utom i beständigt stratifierade områden (Pörtner et al., 2014). Det råder dock stor osäkerhet om hur precisa de befintliga observationerna av NPP är, vilket gör projektionerna osäkra, och med den tillförlitlighet IPCC anger är sannolikheten omkring en på två att den uppskattade effektens riktning inte är korrekt. Högre trofinivåer kan påverkas av dessa förändringar i primärproduktion, men också direkt av andra faktorer. I avsnörda

havsområden som Östersjön finns risk för högre lokalt utdöende av arter, och generellt förväntas ökningen av invasiva arter vara större vid högre latituder än i områden närmare ekvatorn (Pörtner et al., 2014). IPCC framhåller dock att detaljerade kvantitativa uppskattningar är känsliga för modellstrukturer och antaganden.

I sammanfattningen om kustbiotoper så noterar IPCC (Wong et al., 2014) att klippiga kuster är bland de mer välstuderade kustnära ekosystemen. Detta är dock en observation på global skala, och skärgårdar som längs delar av de svenska kusterna kan ha egenskaper som gör att kunskaperna inte säkert är överförbara. De mest tydliga effekterna av uppvärmning vid klippiga kuster är förändringar i artdistribution och artabundans (Wong et al., 2014). Generellt väntas trofisk komplexitet i klippiga kustområden minska (Wong et al., 2014).

Forskning om hur artsammansättning i Östersjön påverkas av klimatfaktorer är relativt omfattande. Den enskilt vanligaste kombinationen av drivkraft och effekt den litteratur vi sammanställt är en koppling mellan temperatur och artsammansättning. De vanligaste organismerna som studeras är olika arter av plankton (i cirka hälften av dessa studier) och bottenlevande organismer. I mindre utsträckning studeras fiskbestånd, då främst sill och torsk. Det vanligast förekommande studieupplägget är fältstudier som utreder historisk samvariation mellan artsammansättning och drivkrafter som temperatur, salinitet och näringsbelastning. Det är också vanligt förekommande med experimentella studier som under kontrollerade former manipulerat dessa faktorer, och då förekommer ofta också partialtryck av CO_2 i atmosfären som en faktor vid sidan av temperatur och salinitet.

I studier som undersöker flera drivkrafters effekt på plankton är uppvärmning oftast rapporterad som den viktigaste drivkraften. I en studie noterades en temperaturdriven ökning av fytoplanktonbiomassa och en viss minskning av zooplankton (Suikkanen et al., 2013). I samma studie tolkades de sammanlagda observationerna av förändringar i artsammansättning som ett generellt skifte mot mindre organismer i näringsväven, vilket i sin tur har lett till mindre näringstillgång för zooplankton och planktonätande fisk (Suikkanen et al., 2013). Flera studier noterar att mekanismerna är komplexa, ibland indirekta, och interagerande. Detta medför att en isolerad effekt av en enstaka drivkraft inte kan förväntas gälla allmänt i framtiden, utan det krävs att hänsyn tas till flera samverkande drivkrafter (Torres et al., 2017). Generellt väntas arters utbredningsmöster förändras då artsammansättningen beror av temperaturen, liksom av andra faktorer.

5.2.2 Effekter av lägre syrehalt

Syrehalten på botten av de djupare delarna av Östersjön har varierat under lång tid, och både klimatvariationer, lokala fysiska faktorer som reglerar utbytet av vatten med Nordsjön, och mänsklig påverkan har varit viktiga faktorer (Conley et al., 2009). Eftersom både klimat- och vindmönster och mänsklig påverkan har varierat över liknande tidsperioder har det varit svårt att separera effekterna för att utröna deras separata betydelser (Conley et al., 2009). Det är dock väl etablerat att övergödning är en viktig lokal drivkraft (Conley et al., 2009, Rabalais et al., 2002). En nyligen upprättad forskningsöversikt om syrebrist med avseende på biogeokemiska faktorer återfinns i Fennel & Testa (2019).

Till en del beror sänkningen av syrehalten i Östersjön också på globala effekter som uppvärmning, i och med att varmare vatten har lägre löslighet av syre. Denna effekt kommer att förstärkas i ett varmare klimat (Meier et al., 2012b). Tre processer relaterade till uppvärmning gör att syrehalten minskar: 1) stärkt temperaturstratifiering på grund av varmare ytvatten, vilket minskar omblandning, 2) minskad löslighet av syre i varmare vatten, 3) uppvärmningens effekter på organismer som producerar eller konsumerar syre (fotosyntes och respiration). Den första processen har studerats i Östersjön och väntas uppträda där också (Hordoir et al 2018, Skudra & Lips 2017), även om förändringar i vindomblandning kan påverka den slutliga effekten. Den andra effekten beror främst på den lokala temperaturökningen i havsvattnet, och den kommer därför också att uppträda i Östersjön, i proportion till havsvattnets uppvärmning. Den tredje effekten är mer komplex då den rör biologiska mekanismer, och i studier av organismers fotosyntes och respiration är inte alltid syrehalten i fokus. I denna undersökning har vi inte specifikt kartlagt studier som undersöker den tredje effekten och kan därför inte separat redovisa dess relevans för Östersjön. Dock finns multi-modellstudier som redovisar de sammanlagda effekterna. Exempel på sådana visar att det är mycket sannolikt att syrehalten sjunker och utbredning av syrefria bottnar växer i Östersjöns djupare delar i ett varmare klimat (Meier et al., 2011).

Studier av syrehaltens effekter på artsammansättning har i stor utsträckning fokuserat på bottenlevande organismer, och kan grovt indelas i två kategorier. Den första kategorin har syftat till att etablera relationer mellan syrehalt och artsammansättning, genom att jämföra data från instrumentella mätningar av syrehalt med artsammansättning från sedimentkärnor tagna från samma period. Den andra kategorin har använt sådana relationer för att dra slutsatser om hur syrehalten har varierat längre tillbaka i tiden, utifrån artsammansättning inhämtad från djupare borrkärnor. Det finns även exempel på studier som undersökt fiskbeståndets sammansättning med avseende på syrehalt, som en av flera faktorer, eller hur mikrobiell artsammansättning varierar med syrehalt på olika djup. Det förekommer också viss kritik, eller anmodan till försiktighet, vad avser studier som använder artsammansättningen hos bottenlevande organismer som indikator (proxy) för andra miljötillstånd, eftersom sambanden som avgör artsammansättning kan vara komplexa (Zettler et al., 2017).

Studier som undersökt effekten av sänkt syrehalt på organismer har bland annat funnit en sammanlagd negativ effekt på torskbeståndet i östra Östersjön, till exempel i en experimentell studie validerad med fältdata (Hinrichsen et al., 2011).

5.2.3 Effekter av havsnivåförändringar

Havsnivåförändringar har påverkat Östersjön i stor utsträckning och under lång tid. I samband med den senaste istidens avslutande har havet genomgått olika stadier, med olika grad av sammankoppling med Nordsjön. Den pågående landhöjningen gör att effekterna av havsnivåförändringar drivna av klimatförändringar kan väntas variera avsevärt i området, med störst lokal påverkan i södra delen där landet sjunker, och mindre lokal effekt i norr, där landhöjningen idag är avsevärt snabbare än havsnivåförändringarna.

Två faktorer som kan ge övergripande effekter på stora delar av eller hela Östersjön är dock viktiga att beakta. Den ena är att havsnivåförändringar inte fördelar sig jämnt globalt. Istället sker en omfördelning av vattenmassa när glaciärer och inlandsisar förlorar massa, vilket medför att

havsnivån lokalt kan stiga mer eller mindre än det globala genomsnittet. Generellt omfördelas massa från det område där det varit bundet till motsatt sida av jorden, vilket innebär att Antarktis avsmältning påverkar havsytehöjningen i Östersjön mer än avsmältningen från Grönland. Idag finns de största osäkerheterna i den framtida havsytehöjningen just i uppskattningarna av bidraget från Antarktis. Det är alltså möjligt att havsytan kan komma att stiga mer eller mindre i Östersjön och Nordsjön än det globala genomsnittet.

Den andra övergripande effekten beror på i vilken mån globala havsnivåförändringar kan väntas påverka utbytet av vatten mellan Nordsjön och Östersjön. I sin tur beror detta på hur den lokala havsnivån förändras både i Nordsjön och Östersjön, och eventuella skillnader däremellan. I sammanhanget bör också nämnas att förändringar i vindmönster kan ha avgörande betydelse på vattenutbytet.

De studier av havsnivåförändringar i Östersjön som fångats in av vår sökning har framför allt utforskat två centrala frågor: dels frekvensen av svängningar i havsnivån, inklusive deras omfattning och historiska och väntade förändringar; och dels paleogeografiska studier som undersöker olika typer av proxydata för att bidra till förståelsen av Östersjöns utveckling. Endast ett mindre antal studier undersöker framtida projektioner och de direkta effekter havsnivåförändringar har, till exempel på inflödet av vatten från Nordsjön, och därmed också på salthalten i Östersjön. En havsytehöjning på en meter skulle enligt en modelleringsstudie leda till en ökad salthalt från 8 till 9 psu i sydligaste Östersjön (Gustafsson, 2004), om hänsyn inte tas till andra effekter. En mindre havsytehöjning på 0,5 m, mer i linje med IPCC:s genomsnitts projektioner för år 2100, skulle inte ha avgörande effekter på Östersjön (Meier et al., 2017). Utöver dessa övergripande projektioner förekommer enstaka studier som utforskar översvämning, erosion och saltvatteninträngning längs olika specifika avsnitt av Östersjöns kuster. Sammantaget har kommande havsnivåförändringar specifikt för Östersjön utforskats endast i begränsad omfattning i den forskningen vi undersökt. Det är dock troligt att mer forskning på området finns eftersom vi inte specifikt sökt efter forskning om havsytehöjning.

I grå litteratur finns flera sammanställningar. Klimat- och sårbarhetsutredningen (2007) anger att havsytan kan väntas höjas med omkring 20 cm mer i våra närliggande havsområden än det globala genomsnittet. I IPCC:s sammanställning av projektioner för havsyteförändring (Church et al., 2013) visar översiktskartor istället att relativ havsyteförändring kan väntas vara lägre än det globala genomsnittet, framför allt i Östersjön men även i Västerhavet. I både Klimat- och sårbarhetsutredningen (2007) och IPCC:s sammanfattning (Church et al., 2013) anges att förändringar i vind- och stormmönster, vilka också påverkar havsyteförändringen, är osäkra. I den mån ökat utflöde från Antarktis har underskattats så omnämns siffror i storleksordningen flera decimeter fram till 2100 (Church et al., 2013). Det är också så gott som säkert att global havsytehöjning kommer att fortsätta under många århundraden, om än i lägre grad i de scenarier där utsläppen minskas kraftigt (Church et al., 2013).

5.2.4 Effekter av utsötning

Havens salthalt varierar globalt med flera faktorer. I det ytliga vattnet beror salthalten bland annat på balansen mellan avdunstning och nederbörd, samt eventuell tillrinning från ytvattendrag och på smältning och frysning av havsis. Salthalten är viktig då den påverkar densitet och därmed

stratifiering av havsvattnet, och den påverkar också biologisk aktivitet i havet och därmed havets utbyte av växthusgaser med atmosfären. IPCC:s sammanställning av forskning visar att salthalten globalt sett ökar i områden där den redan är hög, som i områden kring vändkretsarna där avdunstningen är kraftig, och minskar i områden där vattnet redan är relativt sött och nederbörden är större än avdunstningen, som i polartrakterna (Rhein et al., 2013). Mängden salt i havet är konstant på tidsskalor som är relevanta för mänsklig förvaltning, och därför kan saliniteten enbart ändras med ändring i mängden sötvatten som utbyts med haven. Atlanten har den högsta salthalten av världshaven och har också blivit saltare under det senaste halvseklet (Rhein et al., 2013).

I Östersjön påverkas salthalten väsentligt av episodiska inflöden av relativt salthaltigt vatten från Nordsjön, men också av variationer i tillförsel av sötvatten genom nettot mellan nederbörd och avdunstning, samt avrinning från land. Eftersom Östersjön i övrigt är ett avsnört innanhav är salthalten avsevärt lägre än i Nordatlanten, med en stark gradient från lägre salthalt längst i norr till högre salthalt i söder och närmare Öresund och bälten.

Med avseende på salinitet finns ett antal huvudgrupper i de perspektiv som studerats. En relativt stor andel av studierna utgörs av paleogeografiska studier som undersöker Östersjöns utveckling med hjälp av proxydata i bottensediment, och i något fall med modeller. Ungefär lika vanliga är modelleringsstudier som undersöker Östersjöns nutida eller framtida variation i salinitet, ofta tillsammans med andra faktorer. Dessa studier bygger ofta på kopplade atmosfär-oceanografiska modeller och det är vanligt att faktorer som vind- och lufttrycksmönster undersöks som orsaker till salinitetsvariationer, ibland också tillsammans med mönster i nederbörd och tillrinning från land. Studier som undersöker lokala variationer i salinitet baserade på observerade data förekommer också, om än i mindre omfattning.

Modelleringsstudier som undersöker nutida salinitetsvariationer framhåller både avrinning och nederbörd samt lufttryck och vädermönster som avgörande faktorer för inflödet av vatten från Nordsjön (till exempel Borgel et al., 2018, Meier & Kauker, 2003). Samma slutsats presenteras också i en forskningsöversikt om salthaltsvariationer i Östersjön (Elken et al., 2015). Effekten av reglering av vattendrag på salinitet har undersökts och befunnits vara försumbar (Meier et al., 2003).

Ett antal studier har undersökt utsötning av Östersjön i ett framtida klimat. Meier et al. (2006) genomförde en multimodellstudie med fem globala och fem regionala klimatmodeller för att undersöka salinitetens utveckling till slutet av århundradet. Studien redovisar en förväntad salinitetsförändring för Östersjön som ligger i intervallet -45% till +4% till år 2100, alltså en betydligt större möjlighet till en kraftig utsötning än till någon ökning av saliniteten. En senare multimodellstudie (Meier et al., 2012a) framhåller att saliniteten vid slutet av århundradet kan vara lägre än någonsin uppmätt sedan 1850. Det finns dock lokala avvikelser i kustvatten. En studie av den grunda Kuriska sjön i östra Östersjön visade en framtida ökad salthalt i lagunen, beroende på ökad avdunstning och minskad tillrinning (Jakimavicius et al., 2018).

Vuorinen et al. (2015) undersökte salinitetens förändring med ökad sötvattenstillförsel och de efterföljande effekterna på ekosystemen i Östersjön. Studien identifierade en kritisk övergång vid salthalter omkring 5-7 psu, och indikerade att ett framtida klimat kan innebära omfattande förändringar i utbredningen av centrala bottenlevande arter. Tillsammans med dessa skulle ytterligare 40-50 arters utbredning påverkas i utsträckningar över hundratals kilometer.

5.3 Effekter av förhöjda koldioxidhalter på marina och kustnära ekosystem

Förhöjda koldioxidhalter i atmosfären leder till ett ökat upptag av koldioxid i havsvattnet. En del av den koldioxid som löser sig i vattnet bildar sedan kolsyra som kan dissociera och öka halterna av vätejoner (H^+). Detta kan sammanfattas med jämviktsreaktionerna

$$pCO_2(g) \leftrightarrow CO_2(aq) \quad [1]$$

$$CO_2(aq) + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \quad [2]$$

$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \quad [3]$$

Förhöjda koldioxidhalter i atmosfären leder därför till 1) förhöjda halter av löst koldioxid, 2) förhöjda karbonathalter, och 3) lägre pH, alltså en försurning av havsvattnet. De flesta studier har använt partialtrycket av koldioxid (pCO_2) som oberoende variabel, och i de fallen undersöks den *kombinerade* effekten av dessa tre faktorer. I många fall bedöms dock försurningen (sänkt pH) vara den mest betydelsefulla faktorn.

5.3.1 Effekter av förhöjt partialtryck av koldioxid ($pCO2$)

Den vanligast studerade utfallstypen kopplad till förhöjt CO_2-tryck är hur olika organismer reagerar, både i form av hur de fungerar (t.ex. hur de simmar, växer, förbrukar syre, eller producerar metaboliter) och hur produktiviteten påverkas. De studerade organismerna är bland annat cyanobakterier, växtplankton, zooplankton, tång, havstulpan, sjöborre, kräftdjur, gråsugga och torsk.

Resultaten av studierna är blandade. Vissa studier har indikerat att effekter finns medan andra inte har påvisat några effekter eller att de effekter som finns inte verkar ha någon omedelbar betydelse. Exempelvis studerade Wulff et al. (2018) sammansättningen av ett naturligt mikroplanktonsamhälle från egentliga Östersjön och såg inte några dramatiska konsekvenser av ökade koldioxidhalter i kombination med sänkta salthalter. Dock ansåg man att långtidsstudier behövs för att få ett bättre underlag.

Det är vanligt att effekter av förhöjda koldioxidhalter har studerats i kombination med förhöjda temperaturer. I flera fall har det visats att effekterna av dessa faktorer delvis motverkar varandra, men att effekten av en temperaturhöjning ofta är större än effekten av ökade koldioxidhalter. Bergen et al. (2016) studerade en diatomdominerad algblomning och en blandad växtplanktonblomning och fann att temperaturen, men inte CO_2, påverkade förekomsten av prokaryoter, organiskt kol och organiskt material. Däremot hade CO_2 en signifikant och direkt effekt på sammansättningen av vissa bakteriesamhällen. Sommer et al. (2015) studerade växtplankton (diatoméer och kryptofyter). Den taxonomiska sammansättningen påverkades endast för icke dominerande och sällan förekommande arter. Däremot ökade cellstorleken med ökad CO_2-halt samtidigt som den minskade med ökad temperatur. En annan slutsats var att växtplanktonsamhällen utan kalkskalsbyggande arter är relativt resistenta mot havsförsurning. Pajusalu et al. (2016) har visat att förhöjda CO_2-halter avsevärt kan förhöja fotosyntesen hos kräkel (*Furcellaria lumbricalis*), även kallad gaffeltång. Denna effekt kan dock modifieras av andra faktorer i

miljön, framförallt temperaturen. Även hos blåstång (*Fucus vesiculosus*) har man sett endast små effekter av förhöjda CO_2-halter medan effekterna av en temperaturökning är betydligt större (Werner et al., 2016; Al-Janabi et al., 2016a). I en annan studie där man kombinerade flera olika belastningsfaktorer såg man dock att dödligheten hos plantor som utsatts för uppvärmning och försurning blev lägre vid förhöjda kvävehalter (Al-Janabi et al., 2016b). I samma studie såg man också att plantor som exponerats för uppvärmning och försurning var betydligt känsligare för tillfällig exponering för syrefattigt vatten, vilket illustrerar vikten av att beakta kombinerade belastningsfaktorer.

Almen et al. (2017) studerade simbeteendet hos ett kräftdjur (*Pseudocalanus acuspes*) och konstaterade att det inte visade någon känslighet mot de CO_2-halter som kan förväntas i en nära framtid. Samtidigt lyfte författarna frågan om att kombinationen av flera påverkansfaktorer, som t.ex. ökad temperatur, syrebrist och salinitetsförändringar, kan minska hoppkräftors förmåga att vara resistenta mot sänkt pH. I en studie av hoppkräftor tillhörande släktet Acartia visade Vehmaa et al. (2012) att äggproduktion ökade med ökad temperatur, men att ökningen inte blev lika stor när hoppkräftorna samtidigt utsattes för lägre pH. De såg också att kläckningsframgången blev lägre när pH sjönk under tiden mellan äggläggning och äggkläckning. Denna effekt minskade dock och försvann mot slutet av experimentet, vilket författarna förklarade med att hoppkräftorna möjligen utvecklade en förmåga att bättre ta hand om sina ägg. I en uppföljande studie (Vehmaa et al., 2016) konstaterades en minskning i storlek av honorna vid lägre pH. Författarna såg också indikationer på en tröskeleffekt vid höga CO_2-halter där honorna genom sitt beteende inte längre kunde lindra effekterna av lägre pH och bibehålla normal kläckningsframgång. Den övergripande slutsatsen var att hoppkräftor i Östersjön kan komma att påverkas negativt av de CO_2-halter som kan förväntas i atmosfären inom överskådlig tid.

Även gråsuggor har undersökts för att studera möjliga effekter av havsförsurning. I en av studierna varierade responsen stort mellan olika individer av arten *Saduria entomon*, men på populationsnivå sågs inte några effekter på djurens metabolism eller aktivitet (Jakubowska et al., 2013). I en annan studie undersökte Wood et al. (2014) hälsotillstånd och immunförsvar hos arten *Idotea balthica*. De undersökte populationer som hade utvecklats vid och anpassat sig efter olika salthalter. Populationerna från högre salthalter visade en nedsättning av immunförsvaret med 60-80% vid högre CO_2-halter. De undersökte också halten av proteinkarbonyler som är en indikator för oxidativ stress (nedbrytning av celler eller organ). Hos populationerna från miljöer med högre salthalter var halterna av proteinkarbonyler inte högre vid lägre pH, men det var de däremot hos populationen från lägre salthalter som uppvisade 100% mortalitet. Även i en annan studie kunde man se skillnader i respons mellan populationer anpassade till olika salthalter (Wood et al., 2016).

För torsk (*Gadus morhua*) är resultaten något motstridiga. Frommel et al. (2013) fann inga effekter av ökade CO_2-halter på kläckning, överlevnad eller utveckling av och storlek på otoliter (kristallina ansamlingar av kalciumkarbonat och proteinpartiklar i innerörat). Däremot visade Maneja et al. (2013) att morfologiska effekter på otoliter förekommer hos torsklarver vid sänkt pH, och Dahlke et al. (2017) såg att ökade CO_2-halter resulterade i en signifikant lägre kläckningsframgång och att storleken på larverna vid kläckning var mindre. Samtidigt stimulerade höjda CO_2-halter syreupptagningsförmågan vid låga och intermediära temperaturer (vilket motverkades av förhöjd temperatur). Mitokondriernas funktion påverkades inte av förhöjda CO_2-halter. Sammantaget visade studien enligt författarna att känsligheten för ökade temperaturer hos torskembryon

kommer att öka när koldioxidhalten ökar, och att en omfördelning av begränsade resurser på bekostnad av embryonas tillväxt kommer att ske. Stiasny et al. (2016) undersökte effekten av den CO_2-halt som kan förväntas vid slutet av århundradet (ca 1100 µatm enligt IPCC:s scenario RCP 8.5) på rekrytering av torsk i två olika populationer. Under 25 dagar efter kläckning fördubblades mortaliteten av larver jämfört med dagens CO_2-nivåer. När de sedan modellerade rekryteringen i de två populationerna blev den 8 respektive 24% lägre än i dagsläget. Resultaten visade på vikten av att beakta tidiga levnadsstadier när effekter av klimatförändringar på fiskebestånd ska bedömas. Det har även visats att havsförsurning kan leda till vävnadsskador på lever, bukspottkörtel, njure, öga och magtrakt hos torsklarver (Frommel et al., 2011). Andra studier har visat att havsförsurning kan leda till fler effekter hos andra fiskarter (mestadels icke-kommersiella revfiskar), bland annat minskad luktsensorisk förmåga (Munday et al., 2009), morfologiska förändringar på otoliter (Checkley at al., 2009; Bignami et al., 2013) och beteendestörningar (Dixson et al., 2012; Munday et al., 2010).

5.3.2 Effekter av förändrade karbonathalter

Arter som bygger skal av kalciumkarbonat gynnas i regel av högre karbonathalter i vattnet. När höjningen av karbonathalterna drivs av en ökad koldioxidhalt åtföljs dock höjningen av en pH-sänkning (försurning), vilket gör att lösligheten för kalciumkarbonat ökar, och dessa arter kan då tvärtom missgynnas.

Endast ett fåtal studier har undersökt effekter av specifikt förändrade karbonathalter i Östersjön. Thomsen et al. (2018) undersökte skalbildningsprocessen hos larver av mussla (Mytilus) från olika delar av Östersjön och fann att utvecklingen av skalen försämrades vid för låga halter av löst oorganiskt kol (< 1 mM) och för låga halter av kalcium (< 3 mM). Studien visade också att larver från centrala Östersjön (med låg salinitet) var mer toleranta mot sänkta kalciumhalter och karbonathalter än larver från västra Östersjön (där saliniteten är högre), vilket möjligen skulle kunna förklaras av en genetisk anpassning.

5.4 Bedömning om huruvida övervakningen är tillräcklig

I sin planering för ett nationellt program om havsförsurning (National Research Council, 2010) rekommenderade det amerikanska nationella vetenskapsrådet att ett övervakningsprogram borde inkludera följande parametrar: temperatur, salinitet, syrehalt, kritiska näringsämnen för primärproduktion, och därtill minst två av följande fyra parametrar: löst organiskt kol, pCO_2, total alkalinitet och pH. Dessutom rekommenderades att mätningar skulle utföras på olika djup och inte enbart i ytvatten. Dock så konstaterades att det inte var möjligt att rekommendera en standardiserad uppsättning parametrar för övervakning av de biologiska effekterna av havsförsurning innan de fysiologiska effekterna är bättre kända, och därför rekommenderades ett adaptivt övervakningsprogram (National Research Council, 2010). Rapporten kom också med en rad mer detaljerade rekommendationer för övervakning.

I en något nyare översikt (Sturesson et al., 2018) har Stockholm Environment Institute (SEI) sammanställt forskningsbehov kopplade till mål 14 om haven i Agenda 2030, och också påpekat behov av forskning för att identifiera samordnade övervakningsmetoder kopplade till

havsförsurning och dess effekter på marina organismer. I en översiktsartikel av Havenhand et al. (2018) noteras att man trots många års datainsamling av pH inte kunnat fastslå tydliga långsiktiga trender, dels beroende på tillkortakommanden i mätmetoder men också på att den säsongsmässiga variationen är stor. Sammantaget pekar dessa källor på att övervakningsbehoven i dagsläget inte är helt klarlagda med avseende på försurning av havet.

5.5 Havets och kustbiotopers roll som klimatreglerare och CO_2-sänka

Havet är globalt sett en mycket viktig CO_2-sänka. En betydande del (IPCC anger 30%; Hoegh-Guldberg et al., 2018) av det kol som släppts ut i atmosfären från förbränning av fossila bränslen har hittills tagits upp av haven. Vidare har den överskottsenergi som ackumulerats på jorden sedan industrialiseringen till övervägande del tagits upp av haven, varigenom en kraftigare uppvärmning av land hittills undvikits (Laffoley & Baxter, 2016). Under perioden 1971-2010 har 93% av ökningen av jordens energiförråd hamnat i haven (Rhein et al., 2013).

Frågan om den effekt som mänsklig påverkan (exempelvis övergödning, fiske och fysisk förändring) kan ha på havens och kustbiotopernas roll som CO_2-sänka förefaller endast i mycket begränsad utsträckning vara utforskad, baserat både på det vi funnit i urvalet av litteratur och även generellt utifrån översiktlig granskning av mer övergripande syntesrapporter. Däremot finns relativt omfattande forskning om hur havens och kusternas CO_2-upptag kan ändras på grund av mer globala påverkansfaktorer, i första hand uppvärmningen av havsvattnet och den försurning som följer av förhöjda CO_2-halter i atmosfären. En möjlig förklaring till kunskapsgapet kan vara att det generellt är svårare att kvantifiera de återkopplingsmekanismer som hänger samman med biologisk aktivitet, jämfört med de övergripande geofysiska processerna. En annan förklaring kan vara att studier av effekter från mänsklig påverkan sällan fokuserar på och särskilt redovisar påverkan på CO_2-upptaget i titel och abstract, även om sådana effekter i viss mån undersökts eller kan utläsas från studien.

Det finns dock viss forskning om hur CO_2-upptaget påverkas av ytterligare faktorer, som i vissa fall är mer direkt kopplade till lokal och regional mänsklig påverkan. Exempelvis finns studier som har utforskat antropogena utsläpp som kan väntas påverka biogeokemisk cirkulation, till exempel järn och kväve, och också studerat hur detta påverkar upptag av atmosfärisk CO_2 (Krishnamurthy et al., 2009).

En annan mänsklig påverkansfaktor på havens växthusgasbalans som undersökts i viss mån är övergödning och den efterföljande syrebristen i vattnet. Utbredningen av syrebrist i havet är ett globalt fenomen som observerats på många platser. I Östersjön är övergödning en viktig orsak. På grund av biologiska nedbrytningsmekanismers beroende av syrehalten i vattnet så kan produktion av dikväveoxid (N_2O), en potent växthusgas, öka med en minskande syrehalt (Laffoley & Baxter, 2016). Sannolikt är näringsrika vatten likt Östersjön betydelsefulla källor till N_2O från havet, men hur denna källa påverkas av framtida förändringar som uppvärmning och försurning är osäkert, och effekterna är inte helt kartlagda (Freing et al., 2012). Dikväveoxid är dock mindre betydelsefull än koldioxid och metan för den globala uppvärmningen, och i IPCC:s sammanfattning uppskattas den totala effekten av N_2O på jordens strålningsbalans vara omkring en tiondel så stor som effekten av koldioxid (Myhre et al., 2013). I en tidigare syntesrapport av IPCC uppskattades knappt en tredjedel av de globala källorna till dikväveoxid utgöras av havet, de kustnära zonerna och

vattendragen (Denman et al., 2007, tabell 7.7). I detta fall är det alltså en annan växthusgas och inte själva CO_2-sänkan som påverkas.

Syrebristen kan dock också bidra direkt till påverkan på CO_2-sänkan. Det finns forskning som visar att andelen sjunkande material som når djupt ner i haven tenderar att öka med minskande syrehalt (Laffoley & Baxter, 2016). Eftersom djupet på vilket nedbrytning sker påverkar hur CO_2 fördelas mellan luft och vatten kan förändrade syrenivåer (på grund av övergödning eller andra faktorer) också genom denna mekanism påverka havens förmåga att ta upp CO_2.

Forskningen om mänsklig påverkan på havens förmåga att ta upp CO_2 är alltså begränsad, men på global nivå är sannolikt de storskaliga förändringarna i havets temperatur och försurningsgrad, som beror på mänskliga utsläpp av växthusgaser, betydligt viktigare än regional och lokal påverkan genom övergödning, fiske eller fysisk påverkan. Denna bedömning har vi dock inte funnit stöd för i forskningen vi undersökt, utan den baseras på en uppskattning: dels på den globala räckvidden av uppvärmning och försurning jämfört med den mer begränsade omfattningen av övergödning, fiske och fysisk påverkan, och dels på avsaknaden av forskningslitteratur som undersökt hur dessa mer regionala faktorer påverkar CO_2-upptaget. Eftersom det finns många studier som undersökt mänskliga störningar med fokus på marina organismers eller ekosystems funktion, skulle en sammanställning av dessa resultat eventuellt kunna ge bättre information om effekten av mänsklig påverkan på havens roll som CO_2-sänka. Effekterna är dock komplexa och samverkande, och en sådan undersökning skulle förmodligen kräva avväganden och utredning som mer har karaktär av ny forskning än en kunskapssammanställning.

IPCC publicerade 2018 en rapport om effekterna av 2 graders global uppvärmning jämfört med 1,5 grader (Hoegh-Guldberg et al., 2018). I rapporten sammanställs effekter av klimatförändringar på en rad olika områden, däribland havet, och rapporten noterar att havets upptagningsförmåga av CO_2 minskar. Det finns också tecken på att den biologiska komponenten av havets CO_2-sänka förändras, och att en framtida minskning är den troliga effekten, även om IPCC noterar att tilltron till evidensen inte är högre än medelstark (Hoegh-Guldberg et al., 2018). Överlag bedömer IPCC att tilltron till att tröskeln för att risken är detekterbar och kan tillföras klimatförändringar vid ca 1,3 grader är hög, och att motsvarande tilltro till en tröskel för allvarliga och vitt spridda effekter vid omkring 1,7 grader också är hög (Hoegh-Guldberg et al., 2018). Dessa värden rör effekter på global skala. I arbetet med den här rapporten har vi inte funnit forskning om eventuella motsvarande tröskelvärden som kan gälla för svenska förhållanden.

5.6 Verktyg/styrmedel inom havsförvaltningen för att stärka resiliensen

I detta avsnitt ges först en sammanställning av studier vilka på något sätt undersökt vilka attribut som bidrar med den marina resiliensen samt vilka påverkansfaktorer som påverkar dessa attribut negativt och därför måste minska för att förstärka resiliensen. Därefter görs en sammanställning av studier som på något sätt tar upp åtgärder, styrmedel och kostnader för att minska dessa belastningsfaktorer, och därmed förstärka den marina resiliensen, i Östersjön samt relevanta delar av Nordsjön.

Den marina resiliensen kan enligt Folke et al. (2004) påverkas på grund av följande mänskliga aktiviteter:

- borttagning av funktionella artgrupper och deras responsdiversitet, såsom förlusten av hela trofiska nivåer (top-down effekter),
- effekter på ekosystemen genom utsläpp av avfall och föroreningar (bottom up-effekter) och klimatförändringar, samt
- förändring av storleken, frekvensen och varaktigheten av störningar som biotan är anpassad till.

Det råder enligt Timpande-Padgham et al. (2017) en stor osäkerhet om hur ökade störningar orsakade av klimatförändringar påverkar ett systems resiliens. Effekter på den marina miljön av klimatförändringar kan antingen vara såväl bestående (havsförsurning, temperaturökningar och havsnivåhöjning) som temporära (extrema stormar, översvämningar, värmeböljor). Trots att många ekosystem uppvisar en avsevärd motståndskraft mot olika typer av störningar (t.ex. föroreningar, invasiva arter, exploateringar) anser Beche et al. (2009) att en bestående störning sannolikt resulterar i permanenta förändringar i habitat och minskar ekosystemet/populationers möjlighet till återhämtning. Det finns också en stor oro för hur framtida klimatförändringar kan påverka varaktighet av störningar, deras magnitud, frekvens och skede i tiden (Jacquet & Prodon, 2009; Leigh, 2013). Att det marina ekosystemet i Östersjön och Västerhavet påverkas av flera andra påverkansfaktorer än klimatförändringar innebär att effekterna på dess resiliens är kumulativa vilket försvårar en bedömning av enbart klimatförändringarnas påverkan på resiliens. Det är följaktligen viktigt att identifiera vilka faktorer som upprätthåller grundläggande arter och attribut avgörande för att bibehålla ekosystemfunktioner och tillhandahållandet av varor och tjänster i närvaron av klimatförändringar och dess påverkan på den marina miljön (O'Leary et al., 2017).

5.6.1 Attribut av betydelse för resiliens

Inom forskning nämns ofta tre huvudkategorier av ekologiska attribut (egenskaper) som ligger till grund för ett ekosystems resiliens: biodiversitet (biologisk mångfald), konnektivitet och anpassningsförmåga (Bernhardt & Leslie, 2013). Biodiversitet ökar antalet svar på olika störningar på den marina miljön samt sannolikheten för att arterna kan kompensera för varandra. Konnektiviteten (dvs. spridningsförmågan mellan arter, populationer samt ekosystem) förstärker kapaciteten för återhämtning genom att ge möjlighet till nyrekrytering (inflöde från andra samhällen), öka tillgången till klimatrefuger (områden där effekten av klimatförändringen är liten), samt tillgång till föda/näringsämnen. Anpassningsförmåga definieras som ekosystemets förmåga att lära sig, kombinera erfarenheter och kunskap, anpassa sig till förändrade externa påverkansfaktorer och interna processer samt förmåga att utvecklas inom den nuvarande stabilitetsdomänen. (Berkes et al., 2003).

I ett första steg av denna sammanställning identifierades 422 artiklar (av de 1024 träffar som sökningen gav) vilka användes för att bedöma vilka attribut som är relevanta för den marina resiliensen samt vilka påverkansfaktorer som påverkade dessa. Begreppet resiliens och ett fåtal fall ekologisk integritet (vilket ses som en synonym till resiliens) nämndes i 352 av abstracten,

återhämtningsförmåga i 188, samt motståndskraft i 124.[11] Som tidigare nämnts förekommer det flera olika definitioner av resiliensbegreppet inom forskningen. Vid kodningen utifrån enbart text i abstracts har det inte varit möjligt att bedöma vilken definition på begreppet som avses i respektive artikel. Detta gäller även andra kodningsbegrepp såsom ekosystemansats, styrmedel, åtgärder, kostnader, nyttor, kostnadseffektivitet.

Av de 422 inkluderade artiklarna berörde 23 Östersjön och 32 Nordsjön. 261 artiklar berörde andra marina områden men bedömdes ändå vara av relevans eftersom de omfattade resiliensproblematik eller påverkansfaktorer av betydelse för Östersjön och Nordsjön. För 113 artiklar var antingen problematiken generell för marina områden över lag eller så gick det helt enkelt inte att utifrån abstract avgöra vilket geografiskt område studien berörde.

Tabell 3 belyser vilka resiliensbegrepp (resiliens, ekologisk integritet, motståndskraft samt återhämtningsförmåga) som användes i koppling till olika resiliensattribut av betydelse för den marina miljön. Av de tre huvudkategorierna som lyfts i Bernhardt & Leslie (2013) förekom biodiversitet oftare än konnektivitet och anpassningsförmåga. Habitat (vilket har betydelse för samtliga tre huvudkategorier ovan) förekom i ett stort antal studier följt av näringsväv (beskriver hur olika arter i näringskedjan interagerar med varandra) och genetisk diversitet (vilket indikerar den genetiska variationsrikedomen bland individer eller populationer inom en art)[12].

	Resiliens/ekologisk integritet	Motståndskraft	Återhämtningsförmåga
Biodiversitet	61	35	37
Konnektivitet	34	8	17
Anpassningsförmåga	24	11	12
Habitat	117	31	71
Genetisk diversitet	29	8	14
Näringsväv	30	8	15

Tabell 3. Tvådimensionell matris (heat map) som visar antalet artiklar för varje fråga av typen ”Vilka attribut är av betydelse för den marina resiliensen?”. Siffrorna anger antalet artiklar där författarna har studerat kopplingen mellan olika attribut och resiliens eller till resiliens kopplade begrepp.

[11] I en studie av O’Leary et al. (2017) ges en bild av hur användningen av dessa olika begrepp förändrats över tid inom den vetenskapliga litteraturen. Författarna finner att begreppet resiliens ökat markant de senaste 30 åren medan användningen av begreppen återhämtningsförmåga (recovery) och motståndskraft (resistance) minskat marginellt.

[12] Ju högre genetisk variation desto bättre rustade är arter för förändringar och sjukdomar.

I en studie av Timpane-Padgham et al. (2017) genomfördes en systematisk översikt över ekologiska attribut vilka skapar resiliens gentemot klimatförändringar.[13] Författarna identifierade 45 specifika attribut för resiliens gentemot klimatförändringar vilka indelades i biologiska (t.ex. biodiversitet, arter tillväxttakt) respektive fysiska attribut (t.ex. habitat. klimatrefuger). Översikten omfattade studier kopplade till olika typer av ekosystem (t.ex. skog, sjöar, korallrev, våtmarker, gräsmarker) med ett fokus på restaureringen av dessa. Författarna kom utifrån översikten fram till att främjandet av resiliens är motiverat i syfte att förbättra effekten av olika restaureringsprojekt. De fann även att en planering och övervakning av resiliens gör det nödvändigt att identifiera vad som gynnar restaurerade och naturliga ekosystems anpassningsförmåga samt definiera vilka åtgärder som främjar deras resiliens. De kom fram till att vissa ekologiska attribut, såsom diversitet och konnektivitet, i högre grad än andra främjar resiliensen eftersom de är av betydelse för en mängd olika arter och ekosystem. En förbättrad förståelse för hur olika ekologiska attribut främjar resiliens är enligt Timpane-Padgham et al. (2017) en stor hjälp för att beslutsfattare ska kunna ta fram de bästa strategierna för restaureringar av ekosystem i närvaron av klimatförändringar. Det är enligt författarna även viktigt med övervakning av olika arters och ekosystems gensvar på och återhämtning från olika störningar för att skapa förståelse för vilka attribut som är av störst vikt i att främja resiliens i närvaron av klimatförändringar. Enligt Timpane-Padgham et al. (2017) har genetisk diversitet en betydelse för resiliensen i och med att den ökar möjligheten för olika populationer att svara mot störningar och upprätthåller ekosystemens funktion. Bernhardt & Leslie (2013) betonar att genetisk diversitet, förutom att stärka ekosystemets motståndskraft, även reducerar tiden för återhämtning vid störningar. Betydelsen av näringsväv (food web) för ett marint ekosystems resiliens och motståndskraft studerades av bland annat Vallina & LeQuere (2011).

Det kan även nämnas att 48 av de inkluderade artiklarna betonade sjögräsets betydelse för resiliensen i marina områden, och i Östersjön oftast med ett fokus på ålgräsängar. Hughes & Stachowicz (2004) visar att genetisk diversitet förstärker sjögräsängarnas motståndskraft mot gräsätare (herbivorer) vilket ökar den marina resiliensen mot klimatförändringar. Jankowska et al. (2019) förklarar sjögräsets betydelse som habitat för olika arter i södra Östersjön och ekosystemets resiliens. Klimatförändringar och antropogena belastningar har lett till en betydande minskning av sjögräs i marina områden världen över (Orth el al., 2006, Waycott et al., 2009). Ehlers et al. (2008) betonar vikten av genetisk diversitet hos ålgräs för att förstärka dess resiliens mot klimatförändringar. Williams et al. (2001) beskriver hur genetisk diversitet hos ålgräs påverkar dess tillväxt och individuella tillstånd. I Östersjön har förluster av områden med ålgräsängar på 60 till 100 procent registrerats i Danmark, Sverige och Polen mellan 1900-talet och mitten av 1980-talet (Boström et al., 2014).

Tabell 4 indikerar i vilken grad de olika resiliensattributen kopplas till olika benämningar av förvaltningspolitiken. Förvaltningsbegreppen bevaring, restaurering och skyddade områden förekommer i hög grad, men även havsplanering, anpassningsåtgärder, regleringar och åtgärder

[13]En systematisk översikt har en högre ambitionsnivå än en litteratursammanställning, och innebär att samtliga relevanta studier läses igenom och kvalitetsbedöms. Detta möjliggör för författarna att dra mer långtgående och detaljerade slutsatser rörande olika attributs betydelse för resiliensen eftersom de inte enbart behöver utgå från abstracts (vilket är fallet för en litteratursammanställning). En systematisk översikt kräver dock betydligt mer resurser än en litteratursammanställning, speciellt med avseende på tid.

generellt förekommer i abstract. Ett antal artiklar nämner någon form av ekosystemansats i koppling till förvaltningen av den marina miljön. De kodade förvaltningsbegreppen förekommer oftast i kombination med resiliensattributen habitat, biodiversitet och konnektivitet.

	Bevaring	Restaurering	Skyddade områden	Havsplanering	Anpassning	Regleringar	Åtgärder	Ekosystemansatts
Biodiversitet	15	12	14	3	8	5	8	5
Konnektivitet	10	8	8	2	4	1	5	
Anpassningsförmåga	4	3		1	4	1	5	
Habitat	25	29	27	12	14	7	23	6
Genetisk diversitet	5	2	4	2	2		1	
Näringsväv	2	4	2	1	3	1	4	4

Tabell 4. Tvådimensionell matris (heat map) som visar antalet artiklar för varje fråga av typen ”Vilka förvaltningsbegrepp nämns för olika typer av attribut av betydelse för den marina resiliensen?”.

Baserad på en frågeenkät riktad till experter inom området drog O’Leary et al. (2017) slutsatsen att minskningen av olika belastningsfaktorer och tillämpningen av havsplanering (marine spatial planning) kan utgöra de mest effektiva ansatserna till att förstärka den marina resiliensen.

Att begreppen bevaring, restaurering och skyddade områden ofta nämns i artiklarna kanske kan förklaras av att dessa åtgärder och styrmedel har tydlig positiv effekt på attributen av betydelse för resiliensen och då i synnerhet habitat, konnektivitet och biodiversitet. Begreppet anpassning i förvaltningskolumnen fångar artiklar i vilka det diskuteras möjliga förvaltningspolitiska åtgärder för att anpassa den marina miljön gentemot effekter som orsakas av en försämring av attributen och därmed resiliensen (dvs. anpassningsåtgärder).

Sammanfattningsvis visar litteratursammanställningen att forskning har gjorts i vilken olika attribut av betydelse för den marina resiliensen identifierats. Det är huvudsakligen attributen biodiversitet och habitat som studerats men det förekommer även ett antal studier rörande attributen konnektivitet, anpassningsförmåga, näringsväv och genetisk diversitet. Det förekommer även del forskning kring vilka olika förvaltningspolitiska åtgärder och styrmedel som kan kopplas till dessa attribut. Det rör sig bland annat om bevaring och restaurerade samt skyddade områden.

5.6.2 Påverkansfaktorer för attributen

Tabell 5 illustrerar hur olika påverkansfaktorer förhåller sig till attributen av betydelse för den marina resiliensen. Att attributen biodiversitet och habitat förekommer i högt antal för de flesta påverkansfaktorerna kan möjligtvis förklaras av att dessa i högre grad än andra attribut påverkas av dessa eller att det förekommer mer kunskap som gör det möjligt att koppla länken mellan påverkansfaktorerna och dessa attribut. Konnektivitet är inte lika vanligt förekommande men dyker upp i högre grad för påverkansfaktorerna klimatpåverkan (7) och fiske (9). Detsamma kan sägas

om genetisk diversitet. Näringsväv förekommer huvudsakligen i artiklar vilka adresserar fiske (18), övergödning (11) och klimatpåverkan (8).

	Påverkansfaktor									
	Klimatpåverkan	Försurning	Övergödning	Fiske	Främmande arter	Oljespill	Miljöfarliga ämnen	Konstruktion	Akvakultur	Generell belastning
Biodiversitet	22	6	12	23	5	3	11	9	2	33
Konnektivitet	7		1	9			2	4		16
Anpassningsförmåga	15	3	3	4	1		2	3	3	6
Habitat	45	1	12	32	3	1	9	23	4	57
Gentetisk diversitet	11	1	2	5			3	1		12
Näringsväv	8	3	11	18	2		4			10

Tabell 5. Tvådimensionell matris (heat map) som visar antalet artiklar för varje fråga av typen ”Vilka påverkansfaktorer nämns för olika typer av attribut?”.

Merparten av artiklarna adresserar fler än en påverkansfaktor som påverkar en eller flera av attributen. Förutom vad som fångas upp av tabellen ovan nämndes det även i 67 abstract hur en viss fiskpopulations resiliens (snarare än det marina ekosystemets resiliens) påverkas av någon av de olika påverkansfaktorerna.

Det finns ett antal studier (Palmer et al., 2005; Coté & Darling 2010; Eklöf et al., 2010) som adresserar hur ett ekosystems resiliens påverkas av klimatförändringar i de fall de redan är föremål för en mängd olika belastningsfaktorer, vilket är fallet för Östersjön. Flera samverkande störningsförhållanden kan komplicera insatser för att identifiera, mäta och övervaka motståndskraften inom ett system. Enligt Tedesco et al. (2016) kommer den förväntade kombinationen av en temperaturökning och en minskning av saliniteten att påverka Östersjöns befintliga marina fiskarter negativt. Däremot kommer enligt författarna habitat lämpade för sötvattensfiskarter att öka, i synnerhet för de arter vars tillväxt eller överlevnad gynnas av varmare temperaturer. Dessa förändringar i det gemensamma samhället kommer att påverka fisket och kan kräva modifieringar av befintlig fiskeförvaltningspolitik.

Av de olika påverkansfaktorerna nämndes klimatförändringar i 134 abstract. Vissa abstract var mer specifika om vilken effekt av klimatförändring som adresserades. De effekter som nämns i abstracten är temperaturförändringar (55), Havsnivåförändringar (46), ökad frekvens av stormar (37), översvämningar (22), värmeböljor (13), nederbörd (10) samt torka (2). Klimatförändringars påverkan kopplas i många fall till resiliensattributen specifika arter samt habitat och biodiversitet. Övriga påverkansfaktorer som nämndes var fiske (96), övergödning (49), någon typ av marin eller kustnära konstruktion (38), försurning (33), miljöfarliga ämnen (28), främmande arter (18), akvakultur (11), syrefria bottnar (10), erosion (8) och oljespill (6). I ett stort antal abstract (126) nämndes dock störningsfaktor generellt utan att det specificerades vilken typ av störning det rörde sig om.

I tabell 6 går det att utläsa i vilken grad de olika påverkansfaktorerna kombinerades i olika studier (dvs. där fler än en påverkansfaktor adresserades i samma studie). Exempelvis kombinerades

klimatpåverkan i hög grad med övergödning, försurning och fiske, vilket kan ha att göra med att dessa tre i hög grad påverkas av klimatförändringarna.

	Klimatpåverkan	Försurning	Övergödning	Fiske	Främmande arter	Oljespill	Miljöfarliga ämnen
Klimatpåverkan	134	19	110	16	8	1	5
Försurning	19	33	4	2	2		1
Övergödning	10	4	49	5	3		6
Fiske och akvakultur	16	2	5	96	5		5
Främmande arter	8	2	3	5	18		2
Oljespill	1					6	1
Miljöfarliga ämnen	5	1	6	5	2	1	28

Tabell 6. Tvådimensionell matris (heat map) som visar antalet artiklar för varje fråga av typen ”Vilka påverkansfaktorer nämns i kombination med andra påverkansfaktorer?”.

Övergödning i kombination med klimatpåverkan nämns som en viktig faktor som påverkar den marina resiliensen i ett flertal studier, bl.a. med avseende på dess negativa effekt på habitat (se bl.a. Jonsson et al., 2018). Enbart miljöfarliga ämnen och klimatpåverkan kombinerades med oljespill medan främmande arter ofta förekom i kombination med klimatpåverkan och fiske[14] (vilket är förväntat eftersom klimatförändringar skapar förutsättningar för nya arter att etablera sig samt att närvaron av dessa i många fall kan påverka fisket).

Sammanfattningsvis förekommer det en mängd artiklar vilka adresserar hur olika påverkansfaktorer påverkar de olika attributen som är av betydelse för den marina resiliensen. En stor andel av artiklarna fokuserar på klimatförändringar, övergödning och fiske.

5.6.3 Kostnadseffektivitet av åtgärder och styrmedel

Enligt O’Leary et al. (2017) utgör minskningen av olika belastningsfaktorer samt havsplanering de mest effektiva åtgärderna för att stärka marin resiliens. Det är även därför nödvändigt att ta fram åtgärder vilka får till stånd en minskning av de belastningsfaktorer som har en negativ effekt på den marina resiliensen. Det kan röra sig om åtgärder som minskar belastningen av miljögifter, näringsämnen, överfiske, främmande arter, oljespill, etc. För att minska belastningar på den marina miljön och därmed förstärka dess resiliens kan olika typer av styrmedel (vilka har som syfte att få till stånd konkreta åtgärder) införas på internationell, regional eller nationell nivå. De flesta åtgärder fokuserar på att minska en specifik belastning och inte på att förstärka resiliensen även om ett flertal kan ha den effekten indirekt. Exempel på det senare är åtgärder som har positiv påverkan på habitat såsom skyddade områden. Bernhardt & Leslie (2013) ger ett antal exempel på åtgärder och styrmedel vilka kan ha en direkt positiv effekt på attributen. Åtgärder vilka minskar överexploateringen av olika marina arter (t.ex. fisket) eller vilka minskar belastningen av

[14] Fiske utgör en belastningsfaktor när man överfiskar en eller flera arter (dvs. man fiskar över det maximalt hållbara uttaget) eller ifall fiskemetoderna i sig (t.ex. bottentrålning) har negativ påverkan på exempelvis bottenstrukturer eller bottenfauna.

näringsämnen samt olika typer av föroreningar anses ha positiva effekter på den marina miljöns resiliens.

I syfte att få till stånd åtgärder vilka minskar belastningsfaktorernas negativa effekter på den marina resiliensen (alternativt stärker den) kan ett antal olika styrmedel implementeras. Det kan till exempel röra sig om regleringar, skatter, finansiellt stöd eller informationsinsatser riktade mot de drivkrafter och aktiviteter som ger upphov till belastningsfaktorerna (se figur 2). Styrmedel kan även riktas mot själva belastningen (givet drivkrafter och aktiviteter) som exempelvis finansiellt stöd till våtmarkskonstruktioner och buffertzoner för att minska belastningen av näringsämnen till havet. Styrmedel kan även riktas mot det marina miljötillståndet (givet en viss belastning) som exempelvis inrättandet av marina naturreservat (eller andra typer av marina skyddsområden), bidrag eller krav på restaureringar och återställanden av marina habitat eller förordning om statsbidrag för omhändertagande av oljeutsläpp/spill med mera från fartyg (1983:140). Slutligen kan styrmedel användas för att minska eller kompensera för påverkan av ett givet miljötillstånd, till exempel konventionen om fartygsägares ansvar för skador orsakade av oljeutsläpp från fartygersättningsskyldighet. För en översikt av svenska styrmedel av betydelse för den marina miljön hänvisas till HaV:s rapport 2017:18 ”Social analys med inriktning mot hälso- och sysselsättningseffekter av att uppnå god miljöstatus samt analys av befintliga styrmedel inom den maritima sektorn: Underlag till inledande bedömning 2018 inom Havsmiljöförordningen” (HaV, 2017a).

Av de 107 utvalda artiklar som inkluderar någon form av kostnadsberäkningar berörde 87 Östersjön och 29 Nordsjön (vilket omfattar Västerhavet). Som framkommer av tabell 7 berörde de flesta studierna av kostnadsberäkningar, åtgärder och styrmedel övergödningen följt av fiske och oljespill. Konkreta åtgärder för att minska belastning benämns i högre grad än styrmedel; det är dock inte alltid tydligt utifrån ett abstract vad författarna avser när de använder begreppen åtgärder eller styrmedel. Det kan t.ex. vara så att vissa artiklar inkluderar styrmedel (policy instruments) i begreppet åtgärder (measures). Det finns mycket kunskap rörande kostnadseffektiviteten av åtgärder riktade mot att minska belastningen av näringsämnen till Östersjön, och även nyttan av minskad övergödning adresserades i flertalet abstract. Styrmedel nämndes huvudsakligen i artiklar vilka berörde övergödning, sjöfart, atmosfärisk deposition samt fisket. Forskning rörande kostnadseffektiva åtgärder för att minska övriga belastningar är däremot mer sparsamt förekommande, och då främst för övergödning. I vissa artiklar nämndes modeller i framtagandet av kostnader eller nyttor. Scenarier förekom huvudsakligen i artiklar som adresserade kostnader eller nyttor av minskad övergödning men även för övriga påverkansfaktorer med undantag för främmande arter. Det finns överlag väldigt få studier vilka på något sätt bedömer kostnaderna som uppstår på grund av främmande arter.

	Påverkansfaktor							
	Klimatpåverkan	Övergödning	Fiske	Främmande arter	Oljespill	Miljöfarliga ämnen	Atmosfärisk deposition	Sjöfart
Kostnadseffektivitet	4	37	2		4	2	1	5
Kostnader	6	69	12	2	9	2	8	18
Nyttor	3	20	2		2	1	3	6
Åtgärder	4	60	10	1	7	2	6	13
Styrmedel	2	20	7				8	9
Modell	3	10	3		1		1	2
Scenario	3	27	8		5	2	2	6

Tabell 7. Tvådimensionell matris (heat map) som visar antalet artiklar för varje fråga av typen ”Vilka begrepp kopplade till ekonomiska bedömningar samt modeller och scenarier nämns i kombination med olika påverkansfaktorer?”.

Klimatförändringarna utgör en potentiellt dominerande drivkraft för olika påverkansfaktorer och förändringar av Östersjöns tillstånd vilket innebär svårigheter att uppfylla de miljötillståndsmål som formulerats inom MSFD, BSAP samt de nationella miljökvalitetsmålen kopplade till den marina miljön (Elliott et al., 2015). Dagens framtagna målformuleringar och referensalternativ, mot vilka åtgärdsbehovet bedöms och gentemot vilka åtgärdsprogram implementeras, kan därför behöva revideras på grund av klimatförändringarnas direkta och indirekta effekter på den marina miljön.

Laikre et al. (2016) studerade i vilken grad genetisk diversitet adresseras i olika förvaltningsstrukturer kopplade till Östersjön (bl.a. BSAP, MSFD, WFD, konventionen om biologisk mångfald, habitatdirektivet). Författarna kommer fram till att det inom dessa i hög grad saknas mål och strategier för att skydda den genetiska diversiteten i Östersjön trots dess stora betydelse för resiliensen.

Enligt Gunderson & Pritchard (2002) är det viktigt att åtgärder som genomförs för att minska risken för regimskiften adresserar de gradvisa förändringarna som påverkar resiliensen och inte enbart fokuserar på att försöka kontrollera de olika störningarna och fluktuationerna. De långsamt förändrande variablerna inkluderar enligt författarna saker som markanvändning, näringsämneskoncentrationer, markegenskaper, sötvattensdynamik och biomassa av långlivade organismer.

Sammanfattningsvis förekommer det inom forskningen studier i vilka beräkningar gjorts av kostnader, kostnadseffektivitet samt i vissa fall nyttorna vad gäller minskningen av de påverkansfaktorer som är av betydelse för den marina resiliensen. Vissa av studierna har även adresserat olika åtgärder och styrmedel som kan minska belastningarna. Det är främst med avseende på övergödningsproblematiken som dessa studier genomförts.

5.7 Tillämpning av modeller, prognoser och scenarier i havsförvaltningen

I detta avsnitt ges en sammanställning av de studier vilka på något sätt inkluderar modeller som kan användas (eller används) som underlag för framtagandet av prognoser, scenarier och vilka på något sätt kan bidra med havsförvaltningen vad gäller exempelvis framtagandet av mål, åtgärder och styrmedel.

5.7.1 Modeller, prognoser och scenarier inom forskning

Olika typer av modeller, prognoser och scenarier har tagits fram inom forskningen och kan utgöra viktiga beslutsunderlag för utvecklingen, besluten och förvaltningen av olika mål, styrmedel och åtgärder. De kan till exempel användas för att beräkna effekterna av planerade åtgärder och hantera förändringar i orsakskedjan (se figur 2). BalticNest-systemet är en sammansättning av flera olika modeller samt datakällor och har använts inom Östersjöförvaltningen (bl.a. för BSAP). Systemet innehåller två marina modeller (SANBALTS och BALTSEM), en avrinningsområdesmodell, en fiskfångstmodell samt en kostnadsminimeringsmodell (för åtgärder vilka minskar belastningen av kväve och fosfor till Östersjön). Liksom BalticNest-systemet förekommer det ofta att olika typer av modeller länkas till varandra, t.ex. i syfte att beskriva hur näringsbelastning från kuster samt atmosfärisk deposition tillsammans påverkar tillståndet i det marina ekosystemet (t.ex. fiskbiomassa, övergödning, främmande/invasiva arter, syrefria bottnar, salthalt, vattentemperatur, biodiversitet) (se t.ex. Jutterström et al., 2014; Meier et al., 2018).

I Tabell 8 har samtliga relevanta artiklar vilka inkluderar någon typ av modell kodats med avseende på vilken eller vilka påverkansfaktorer modellen adresserar samt huruvida modellen använts för att ta fram prognoser eller scenarier. Det indikeras även ifall studien adresserat den marina förvaltningen överlag eller mer specifikt i form av konkreta åtgärder eller styrmedel. Artiklarna har även kodats med avseende på om ekosystemansatsen nämnts i samband med förvaltningen samt om någon typ av ekonomisk bedömning genomförts.

	Påverkansfaktor						
	Klimatpåverkan	Försurning	Övergödning	Fiske	Främmande arter	Oljespill	Miljöfarliga ämnen
Scenarier	46		32	41	2	7	1
Prognoser	16	1	9	14	1	2	2
Förvaltning	63	3	60	150	5	12	8
Mål	8	1	14	15			1
Åtgärder	22		36	29	2	6	1
Styrmedel	16	4	27	57	2	2	2
Ekosystemansatts	21	1	9	31	1		
Ekonomisk bedömning	16		28	55	2	6	1

Tabell 8. Tvådimensionell matris (heat map) som visar antalet artiklar innehållande modeller för varje fråga av typen ”Vilka begrepp för förvaltning samt beslutsunderlag nämns i kombination med olika påverkansfaktorer?”.

Som framgår av matrisen ovan finns det en mängd artiklar vilka inkluderar modeller för olika miljöproblem i Östersjön och Nordsjön. Det går dock inte alltid att fastställa utifrån abstract ifall modellerna inkluderar hela Östersjön/Nordsjön eller bara begränsade delar av dessa (t.ex. kust- eller havsråden). Det är i de flesta fall inte heller möjligt att utifrån abstract avgöra vilken typ av modell (t.ex. biokemiska, hydrodynamiska, artdistributionsmodeller) som använts i studien.

Det är huvudsakligen fiske, övergödning samt klimatpåverkan som adresseras i modellerna, vilket kanske dels kan förklaras av förvaltningens fokus på dessa områden (t.ex. Helcoms BSAP och EU:s gemensamma fiskepolitik) men även för att de kanske är lättare att modellera. Flertalet modeller som adresserar fiske är bioekonomiska vilket innebär att de inkluderar fiskbiomassan med fiskerinäringens ekonomiska parametrar (såsom kostnaderna av att driva fisket samt det ekonomiska värdet av fångsten). Att det finns färre studier i vilka främmande arter, oljespill och andra miljöfarliga ämnen modelleras kanske förklaras av svårigheterna att modellera orsaks-händelsekedjan för dessa.

Det förekommer ett stort antal artiklar i vilka modeller används för framtagandet av prognoser eller scenarier. Flertalet studier har tagit fram modellbaserade scenarier i vilka klimat ingår som en faktor. Någon form av prognos eller scenario inkluderas i 174 av artiklarna, huvudsakligen för miljöområdena klimatpåverkan, övergödning och fiske vilket kanske kan förklaras av att det är svårt att modellera och bedöma den framtida utvecklingen av främmande arter, oljespill och andra miljöfarliga ämnen. Utifrån ett förvaltningsperspektiv nämns förvaltning generellt eller mer specifikt i form av olika typer av mål, åtgärder och styrmedel i flertalet artiklar. Flertalet av artiklarna (innehållande modeller) adresserar någon form av samhällsekonomiska bedömningar av kostnader och nyttor, speciellt med avseende på fiske, övergödning och klimatpåverkan.

Globala scenarier (som de IPCC använder) behöver skalas ner till den relevanta regionen (Östersjön) för att kunna illustrera hur olika klimatförändringsscenarier påverkar den marina miljön i Östersjön och Västerhavet. Dessutom behöver regionala scenarier som baseras på en eller flera globala scenarier vara kompatibla med de senare. Så kallade policyscenarier kan tas fram i vilka man bedömer hur implementeringen av policymål, styrmedel och åtgärder påverkar den framtida utvecklingen. Regionala klimatmodeller har använts för att skala ner IPCC:s scenarier till Östersjön i syfte att bedöma vad dessa innebär för Östersjöregionen (Meier et al., 2018). Globala narrativa socioekonomiska scenarier benämnda Shared Socioeconomic Pathways (SPS) framtagna för klimatforskning har i Zandersen et al. (2019) skalats ner och modifierats till Östersjöregionen.

Meier et al. (2018) använde sig av en ensemble av flera olika modeller i syfte att adressera olika modellers osäkerheter i framtagande av prognoser och scenarier. För att uppskatta osäkerheter utvärderade författarna det största antalet olika modell-ensembler för Östersjön. Författarna finner stora skillnader mellan de senaste scenariosimuleringarna för Östersjön, både vad gäller historiska och beräknade framtida klimatförändringar. Vissa modeller fungerar bättre än andra när utfall jämfördes med tillgängliga övervakningsdata från 1980 till 2005. Resultaten för ensemblesammantagna förändringar mellan framtida och nuvarande klimat visade sig dock vara robusta. Trots den stora spridningen i prognoserna kommer enligt Meier et al. (2018) genomförandet av BSAP att leda till en betydande förbättring av Östersjöns miljöstatus. Saraiva et al. (2018) utvecklade scenarier vilka, blanda annat, visade att klimatförändringar kommer att förstärka effekterna av övergödning och primärproduktion i Östersjön. Emellertid är enligt

författarna miljöeffekterna av klimatförändringar (baserat på de övervägda växthusgasutsläppsscenarierna) mindre än effekterna av de modellerade näringsbelastningsförändringarna. Liksom Meier et al. (2018) kom även Saraiva et al. (2018) fram till att uppfyllande av BSAP:s näringsämneskvoter leder till förbättrade miljöförhållanden i Östersjön oberoende av framtida klimatförändringar.

Enligt Blenckner et al. (2015) utgår en stor del av nuvarande planering och modellering från uppfattningen om en värld i jämvikt, vilken i hög grad antar linjära eller förutsägbara orsaks-effektsamband. Att bedöma de potentiella konsekvenserna av mänskliga sociala och ekonomiska drivkrafter på marina system blir enligt författarna därmed en utmaning eftersom dessa kan kännetecknas av icke-linjära samband eller oförutsägbara orsaks-effektsamband. Användandet av scenarioanalyser, i vilka konsekvenser av olika möjliga utvecklingar illustreras, kan enligt Blenckner et al. (2015) bidra med att beskriva möjliga framtida utvecklingar för politiker och beslutsfattare i närvaron av icke-linjäritet (t.ex. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) 1997, Raskin et al., 1998, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2000, Rotmans et al., 2000, Shell 2002, Millennium Ecosystem Assessment 2003, Meier et al., 2012b).

Modellbaserade scenarier utvecklade av Meier et al. (2012a) tyder på att klimatförändringar leda till en uppvärmning samt minskad salinitet av Östersjön vilka överträffar tidigare uppmätta nivåer (mätningsdata existerar så lång tillbaka som 1850) och att klimatdrivna förändringar kan komma till stånd tidigare än beräknat. Dessa förändringar kan innebära en övergång från marina till sötvattensarter i Östersjön, vilket kan leda till en minskning av kommersiellt viktiga fiskarter såsom torsken (Niiranen et al., 2013). Andra framtagna scenarier indikerar en avsevärd ökning av aktiviteter som har betydelse för Östersjöns miljötillstånd, såsom jordbruksproduktion, marina transporter, samt energiproduktion (se t.ex. Agrimonde, 2009; Öborn et al., 2011; WWF, 2012).

Sammanfattningsvis indikerar sammanställningen att det finns en mängd olika modeller vilka beskriver olika händelsekedjor av relevans för den marina miljön. Även prognoser och scenarier har tagits fram (ofta med hjälp av modeller) rörande den framtida utvecklingen av den marina miljön. Det är viktigt att modeller och scenarier tar hänsyn till närvaron av icke-linjära samband samt oförutsägbarhet.

5.7.2 Användning av modeller, prognoser och scenarier inom havsförvaltningen

Modeller, prognoser och scenarier kan på olika sätt vara behjälpliga som beslutsunderlag i havsförvaltningen. De nationella kvoter för N- och P-belastning som togs fram för respektive land, som har kust mot Östersjön[15], inom BSAP baserades på BalticNest-systemet som kombinerade flera olika modeller (Reusch et al., 2018). Dessutom har BalticNest-systemet möjlighet att leverera olika scenarier för Östersjön och delar av Västerhavet. Uppfyllandet av BSAP är ett exempel på mål som ofta används för att utveckla olika scenarier (HaV, 2013a). Scenarier för den marina miljön kan användas eller bidra till policyutveckling, förvaltning och beslutsprocesser på ett antal olika sätt såsom att (HaV, 2013b):

- Beskriva olika möjliga framtider för Östersjön och dess avrinningsområde.

[15] Det vill säga Danmark, Estland, Finland, Lettland, Litauen, Polen, Ryssland, Sverige och Tyskland.

- Kommunicera stora mängder komplex information.
- Överbrygga naturvetenskap och förvaltning.
- Identifiera olika framtida problem/hot mot den marina miljön.
- Fokusera åtgärder där de får mest effekt på målet.
- Identifiera robusta åtgärder, vilka har önskad effekt i flest scenarier.
- Uppmärksamma allmänheten på olika miljöfrågor.
- Illustrera effekterna av olika policyalternativ.
- Ta fram viktigt underlag till forskningen.
- Identifiera en strategi som leder till ett önskat tillstånd.
- Skapa beredskap eller strategier för utfallet av olika scenarier.
- Identifiera signaler som indikerar att man är på väg in i ett visst scenario.

Ekonomiska modeller i kombination med naturvetenskapliga har använts för kostnad-nyttoanalyser vilka stimulerat och motiverat att (kostnadseffektiva) åtgärder vidtagits (Reusch et al., 2018; HaV, 2013a). Utan scenarier eller prognoser är det inte möjligt att fastställa ett framtida referensalternativ vilket behövs för att kunna bedöma ifall beslutade åtgärder och styrmedel når det önskade miljötillståndet. Zandersen et al. (2019) drar utifrån sin studie slutsatsen att det i Östersjöregionen råder en brist på användandet av scenarier vad gäller hur globala och regionala utvecklingar påverkar regionen som underlag för beslutsprocesser.

I Tabell 9 nedan framkommer i vilken grad olika artiklar, vilka inkluderar modeller för olika påverkansfaktorer, adresserat olika begrepp kopplade till själva förvaltningssystem, såsom EU-direktiv, BSAP, havsplanering.

	Påverkansfaktor					
Förvaltningsaspekt	Klimatpåverkan	Övergödning	Fiske	Främmande arter	Oljespill	Miljöfarliga ämnen
Marina direktivet	6	6	6	1		
Vattendirektivet	4	9				
Baltic Sea Action Plan (BSAP)	8	10				
ICES/CFP	1		15			
Havsplanering	2		4	1	1	1
Skyddade områden			11		2	2

Tabell 9. Tvådimensionell matris (heat map) som visar antalet artiklar för varje fråga av typen ”Vilka förvaltningsaspekter som nämns i kombination med andra påverkansfaktorer?”.

EU:s Marina direktiv (MSFD) nämns i flertalet abstract vilka adresserar klimat, försurning, övergödning, fiske samt främmande arter. EU:s vattendirektiv nämns i abstract rörande klimatpåverkan samt övergödning. Aktionsplan för Östersjön (BSAP) nämns i studier vilka adresserar klimatförändringar och övergödning. Att BSAP inte nämns i relation till fisket beror på att det är ett område som inte omfattas av denna aktionsplan. Däremot tar ICES (International Council for the Exploration of the Sea) fram underlag och ger råd till EU:s gemensamma fiskepolitik (CFP), vilket förklara varför dessa två nämns i 15 artiklar kopplade till fisket. Marin havsplanering berörs i 9 abstract kopplade till klimatpåverkan, fiske, främmande arter, oljespill och andra miljöfarliga ämnen. Vad gäller specifika styrmedel nämns skyddade områden huvudsakligen i artiklar vilka adresserar fisket, men även i artiklar som behandlar oljespill och belastningen av andra miljöfarliga ämnen.

I en studie av Tedesco et al. (2016) undersöks vilka av existerande Östersjömodeller som kan adressera frågeställningar i det marina direktivet. Författarna fann att trots att befintliga ekosystemmodeller för Östersjön inkluderar flera påverkansfaktorer samt deskriptorer kvarstår det fortfarande ett antal luckor som måste fyllas innan modellerna förmår utvärdera Östersjöns miljötillstånd i enlighet med det Marina direktivet. Författarna fann att t.ex. habitat samt främmande arter inte fångades upp i tillräckligt hög grad av existerande modeller.

Modeller för fiskpopulationer har ofta utgjort underlag för att ta fram fiskekvoter (styrmedel) inom olika marina områden (Reusch et al., 2018). Reusch et al. (2018) anser att den rådande fiskeförvaltningen hotas av ökningen av ytterligare belastningar på Östersjön såsom uppvärmning, syrebrist och störningar i näringsvävar. Detta innebär enligt författarna att de modeller och förvaltningsramar som fungerat tidigare kan vara för ekologiskt begränsade för att fungera i framtiden. Östersjön utgör enligt Reusch et al. (2018) ett övertygande exempel för hur en intensiv, i dagsläget hållbar, exploatering kan bli ohållbar under nya, och försämrade, ekologiska förhållanden (p.g.a. minskad salinitet, ökad nederbörd och avrinning från land i kombination med uppvärmning och syrebrist).

Ett exempel från Nordsjön på hur scenarier kan användas ges i en studie av Heymans et al. (2011). Författarna visar på möjliga avvägningar mellan ett framtida scenario i vilket syftet är att maximera lönsamheten i fisket mot ett annat scenario vilket innebär ett mer resilient ekosystem med mer långlivade fiskarter. Studien fann att det skulle behövas en helt annan struktur på fiskeflottan än den rådande för att uppnå dessa scenarier och att det skulle ha stora effekter på ekosystemet. Studien visade även att befintliga subventioner inom näringen påverkar fiskets lönsamhet samt det marina ekosystemet negativt genom att skapa incitament till ökat fisketryck. Ett avskaffande av dessa fiskesubventioner föreslogs av författarna som en del av en ekonomiskt hållbar förvaltningsstrategi vilket skulle öka systemets övergripande motståndskraft. För Östersjöns del drar Nielsen et al. (2019) slutsatsen att fiskekvoter utgör det optimala styrmedlet för att maximera samhällsekonomiska välfärdsvinster.

Enligt Blenckner et al. (2015) kan förstärkningen av den marina resiliensen ses som en viktig åtgärd inom ekosystembaserad förvaltning för att minska risken för regimskiften. Folke et al. (2004) förespråkade en adaptiv ekosystembaserad förvaltning (vilket nämns i flertalet artiklar i sammanställningen) för att förhindra regimskiften. EU:s marina direktiv har som tydligt syfte att åstadkomma en sådan förvaltning (artikel 3, paragraf 5). Adaptiva förvaltningsstrukturer måste

enligt Olsson et al. (2004) (i) bygga upp förståelsen och kunskapen av naturresursers och ekosystemens dynamik, (ii) utveckla praxis för att förstå och hantera återkopplingsmekanismer inom ekosystemet, och (iii) stödja flexibla institutioner, organisationer samt adaptiva förvaltningsprocesser. En adaptiv förvaltning kräver en effektiv tillsyn av vilka åtgärder som genomförts samt en förståelse kring incitamentsstrukturer kopplade till efterlevnadsgraden av olika styrmedel eftersom det kan ta lång tid innan åtgärderna ger de önskade effekterna på ekosystemet (Varjopuro et al., 2014). Bernhardt & Leslie (2013) ansåg att en adaptiv förvaltning är nödvändig för att upprätthålla den ekologiska resiliensen i närvaron av klimatförändringar oavsett vilken förvaltningsstrategi som tillämpas.

Närvaron av återkopplingsmekanismer kan innebära att man inte ser några förbättringar i miljötillståndet trots att man genomfört en havsförvaltningspolitik som varit framgångsrik i att minska belastningarna. Exempelvis visar Gustafsson et al. (2012) att primärproduktionen i Östersjön inte minskats (och under vissa år t.o.m. ökat) trots att fosforbelastningen minskat. Författarna, samt också Murray et al. (2019), visar dock att en fortsatt minskning på lång sikt kommer att generera en minskning av primärproduktionen och därmed förbättring av miljötillståndet. Reusch et al. (2018) drar slutsatsen att det krävs en revision av förvaltningen på grund av globala förändringar (såsom klimatförändringar) vilka interagerar med regionala störningar (t.ex. invasiva arter, fiske och övergödning). De efterlyser därmed en förvaltning som är såväl konservativ som adaptiv. De anser det även nödvändigt att förvaltningssystemen i högre grad är inkluderande i det att berörda samhällsaktörer deltar och att samt att de baseras på sektorsövergripande samarbeten (dvs. horisontell integration).

Bernhardt & Leslie (2013) kommer fram till att om den marina miljön i försättningen ska kunna tillhandahålla de olika ekosystemtjänster som människor drar nytta av så är det nödvändigt att skydda de ekologiska mekanismer som möjliggör för marina ekosystem att motstå, återhämta sig från, samt anpassa sig till klimatförändringar (dvs. deras resiliens). Eftersom den marina resiliensen påverkas av ett antal olika belastningsfaktorer behöver förvaltningssystemet som avser stärka denna resiliens vara horisontellt integrerat (Scharin et al., 2016). Graden av horisontell integrering indikeras av hur väl styrmedel mellan olika miljöproblem samverkar alternativt motverkar med varandra. Att inom t.ex. fiskepolitiken även ta hänsyn till fiskets påverkan på övergödningen samt klimatförändringarnas påverkan på fisket är ett exempel på horisontell integration. Helcoms aktionsplan för havsmiljö (BSAP) samt EU:s marina direktiv utgör exempel på viss grad av horisontell integrering av havsmiljöförvaltningen.

Förvaltningssystemet behöver även vara vertikalt integrerat vad gäller lokala, nationella samt regionala mål, åtgärder och styrmedel. Graden av vertikal integrering indikeras av hur väl styrmedel ligger i linje med varandra över de olika geografiska skalorna. Om lokala och nationella styrmedel överensstämmer med de regionala och internationella är graden av vertikal integrering hög (och vice versa). Införlivandet av EU:s ramdirektiv för en marin strategi (2008/56/EG), i den svenska lagstiftningen genomfört genom Havsmiljöförordningen (SFS 2010:1341), utgör ett exempel på vertikal integrering. Eftersom klimatförändringar är ett globalt miljöproblem och Östersjöns resiliens är regional så är vikten av vertikal integrering av förvaltningspolitiken av stor betydelse. Det faktum att flertalet av de aktiviteter som påverkar Östersjön (såsom fiske och sjöfart) i hög grad bedrivs av internationella aktörer förstärker betydelsen av vertikal integrering.

För att hantera osäkerhet samt icke-linjära samband (återkopplingsmekanismer och regimskiften) i praktiken är det enligt Blenckner et al. (2015) viktigt att säkerställa lärande, flexibilitet och nätverkande i de olika beslutsprocesserna. Detta kräver enligt författarna såväl horisontell som vertikal integration med avseende på informationsutbyte och samarbete. Svårigheterna i att adressera olika typer av osäkerheter utgör enligt Udovyk & Gilek (2013) en av de största utmaningarna i förvaltningen av Östersjön. För att möta de olika utmaningarna kopplat till de marina miljöproblemen och till dessa kopplade osäkerheter finns ett behov av nya integrerade adaptiva förvaltningsstrategier (t.ex. Wise et al., 2014; Haasnoot et al., 2013). Ett viktigt underlag för sådana strategier är scenarier vilka förmår identifiera de åtgärder som behövs under olika möjliga framtida utfall (Scharin et al., 2016). Genom att använda Bayesianska beslutsmodeller kan man för vissa problem identifiera vilka osäkerheter som det kan vara mest motiverat att minska (se t.ex. Barton et al., 2005).

I en studie som adresserar förvaltning kopplat till Östersjöns övergödningsproblematik drar Varjopuro et al. (2014) slutsatsen att vid närvaron av tidsförskjutningar mellan åtgärd och miljöeffekt är det nödvändigt för en adaptiv förvaltning att vara reflexiv, inkluderande samt att ett övervakningssystem är utvecklat. Utöver miljötillståndet bör övervakningen enligt författarna också riktas mot genomförandet av politiken för att säkerställa att samhällena investerar i rätt åtgärder.

Enligt Bernhardt & Leslie (2013) samt Scharin et al. (2016) är övervakning av miljötillståndet i syfte att bedöma effekten av olika åtgärder en nödvändig del av en adaptiv förvaltningsstrategi eftersom mål kan behöva revideras och styrmedel anpassas i takt med att ny kunskap erhålls. Författarna påpekar även att en adaptiv förvaltning måste kunna ta beslut om åtgärder och styrmedel även i närvaron av osäkerheter rörande framtida utvecklingar. Ett sätt att hantera sådana osäkerheter enligt författarna kan vara att utifrån framtagna scenarier identifiera vilka åtgärder som har effekt oavsett hur framtiden utvecklas.

Sammanfattningsvis indikerar litteratursammanställningen att modeller, scenarier och prognoser kan användas som beslutsunderlag i havsförvaltningen och att det i vissa fall (t.ex. BSAP, EU:s gemensamma fiskepolitik) redan används. Flertalet studier inom området understryker vikten av en adaptiv havsförvaltning i syfte för att bland annat kunna hantera de osäkerheter och icke-linjära samband som är vanligt förekommande vad gäller de marina miljöproblemen.

6 Diskussion

6.1 Litteratursammanställningens begränsningar

En litteratursammanställning är en översikt över befintlig publicerad forskning. Vi har haft ambitionen att på ett systematiskt sätt gå igenom den vetenskapliga litteratur som studerat klimatförändringarnas påverkan på havet, och hur havsförvaltningen kan utformas för att hantera det. Flera viktiga begränsningar är dock viktiga att vara medveten om. För det första har vi inte haft möjlighet att studera hela forskningslitteraturen, utan har fokuserat på forskning som rör svenska förhållanden. Därför är de slutsatser vi kan dra huvudsakligen begränsade till detta urval (vissa mer översiktliga syntesrapporter vi studerat, t.ex. från IPCC och IUCN, sammanställer dock i sin tur ett bredare urval av litteratur). Den främsta risken med ett begränsat litteratururval är att urvalet kan vara snedvridet, så att den litteratur vi undersökt inte är representativ för den totala mängd litteratur som finns. Vi bedömer att det finns risk att vissa forskningsområden inte fångats in av sökningen, framför allt forskning om de påverkansfaktorer som inverkar på havsmiljön från land. Samtidigt bedömer vi att den marina Östersjöforskningen bör vara relativt väl representerad utan avgörande snedvridningar. Vi är mindre säkra på att forskning om miljön i Västerhavet har fångats in på ett representativt sätt, eftersom det inte finns lika entydiga begrepp som konsekvent används för att skilja ut denna forskning geografiskt. I vidare mening kan vi inte heller säga att urvalet är representativt för global forskning om havet.

En annan begränsning är att sammanställningen av forskningen har gjorts utifrån abstract. Ett abstract innehåller en kort sammanfattning av en forskningsartikel, men metoder, antaganden och resultat redovisas inte alltid fullt ut. Därför finns en risk att forskningens innehåll inte på ett heltäckande sätt är representerat i de kvantitativa sammanställningar vi redovisar. Vi bedömer dock att risken för avgörande avvikelser i det övergripande mönstret är relativt liten, jämfört med vad en mer fullständig genomgång av de studerade artiklarna skulle resultera i, eftersom svårigheter att utläsa artikelns fullständiga innehåll utifrån abstract bör fördela sig relativt slumpmässigt över de faktorer och utfall som vi kodat artiklarna efter.

6.2 Kunskap och kunskapsluckor

De tabeller, eller så kallade ”heat maps”, som visas i denna rapport visar vilka frågor forskningen har fokuserat på och vilka frågor som tilldragit sig mindre intresse. Det ska dock påpekas att det kan finnas helt naturliga förklaringar till att vissa rutor i tabellerna är tomma. Ibland finns det helt enkelt ingen koppling mellan en viss påverkansfaktor och ett visst utfall. Ett exempel på detta är att havsnivåförändringar inte har någon direkt effekt på vattentemperaturen. Det ska också understrykas att en forskningslucka inte självklart innebär ett forskningsbehov. För att svara på vilka forskningsbehov som finns krävs också en bedömning av hur angeläget det är att fylla en identifierad lucka.

Forskning om uppvärmningens effekter har studerats brett och över många områden. Det finns dock en tyngdpunkt på studier som undersöker organismers funktion och sammansättningen av arter. En viktig synbar kunskapslucka är uppvärmningens effekter på avrinningen, eftersom

avrinningen starkt inverkar på den totala näringsbelastningen (Basu et al., 2010) och därmed ekosystemen och havets resiliens. I denna undersökning har vi endast funnit ett fåtal studier som undersökt förändringar i avrinning, men troligtvis är detta en konsekvens av de avgränsningar vi gjort i sökningen. Ytterligare forskning finns med säkerhet på detta område. Det kan alltså finnas skäl att särskilt sammanställa forskning om hur vattenflödesförändringar och andra faktorer på land påverkar havet.

Den forskning om havsnivåförändringar som vi funnit har i relativt stor utsträckning fokuserat på historiska och nutida variationer. I jämförelse finns det relativt få studier av den framtida havsnivåhöjningens effekter på Östersjön och dess kuster i vår sökning. Vi har dock inte riktat sökningen efter just artiklar som innehåller termer relaterade till havsnivåhöjning, och det finns sannolikt mer forskning på området som inte fångats in.

Klimatförändringar leder till förlust av havsis, och på global skala har detta fenomen mycket omfattande konsekvenser, både på klimatsystemet och på ekosystemen (särskilt i Arktis). I den här rapporten har vi inte specifikt undersökt forskning om havsisen och hur förändringar i den kan väntas påverka ekosystemen. Det kan därför vara angeläget att undersöka effekter av minskad havsisutbredning också i Östersjön. I sökningen har vi endast funnit ett litet antal artiklar som fokuserat på havsis. I Granskog et al. (2006) och Vihma & Haapala (2009) sammanfattas kunskaper från två översiktsartiklar på området.

Det finns bra kunskap rörande vilka attribut som är av betydelse för den marina resiliensen samt vilka påverkansfaktorer som påverkar denna negativt. Det förekommer dock en relativt stor kunskapslucka rörande konkreta åtgärder som kan vidtas för att stärka resiliensen. Däremot finns det en hel del kunskap kring åtgärder som minskar specifika belastningsfaktorer av betydelse för resiliensen. Merparten av denna forskning har berört klimatförändringar, övergödning och fiske medan det gjorts färre skattningar på åtgärder, styrmedel, kostnader och nyttor för främmande arter och miljöfarliga ämnen.

Förekomsten av modeller och scenarier inom forskningen visar ett liknande mönster i det att det finns många modeller och tagits fram fler scenarier rörande klimatförändringar, övergödning och fiske medan det finns kunskapsluckor inom de övriga miljöområdena. Dessa luckor kan dock bero på svårigheten att modellera orsak-effektkedjan av vissa miljöproblem på grund av exempelvis bristande kunskap eller närvaron av icke-linjära samband.

6.3 Andra relevanta rapporter

En omfattande vetenskaplig sammanställning av klimatförändringars effekter på Östersjön finns sammanställd i rapporten BACC 2 (”Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin”, BACC II Author Team, 2015). Rapporten behandlar både historiska, nutida och framtida klimatförändringar i Östersjöområdet, samt deras drivkrafter och effekter.

I arbetet med havsplanering har Havs- och vattenmyndigheten (HaV) tagit fram rapporter som underlag för arbetet. I rapporten ”Havsplanering med hänsyn till klimatförändringar” (HaV, 2017b) sammanställde Havenhand och Dahlgren teori på området, och gick också igenom praktisk relevans av teorin samt gav ett antal rekommendationer.

Rapporten fokuserade i första hand på marin ekologi och vår förståelse för hur den påverkas av klimatförändringar. Resiliensbegreppet är viktigt i detta sammanhang men svårt att kvantifiera. Därför används ofta biologisk mångfald (biodiversitet) som en indikator på ett ekosystems resiliens, eftersom den både är lättare att kvantifiera och har ett tydligt samband med systemets resiliens.

I rapporten gick författarna också igenom olika modellansatser för att förstå hur den biologiska mångfalden kan komma att förändras i ett ändrat klimat. I huvudsak är dessa ansatser av två typer: artdistributionsmodeller (species distribution models, eller SDM) samt mekanistiska modeller. På grund av begränsade data och svårigheter att kvantifiera alla relevanta processer är SDM-ansatser vanligare, och även om dessa modeller har begränsningar i tillförlitlighet är de av värde för att ge information om möjliga förändringar i framtida artutbredning (HaV, 2017b).

I teoriöversikten gavs också en översikt av de mekanismer som påverkar biologisk mångfald, hur arter sprider och förökar sig (konnektivitetsteori), samt klimatrefuger och ”hot spots”, dvs mindre områden där arter kan överleva i ett ändrat klimat respektive områden där förändringarna kan väntas vara särskilt snabba eller kraftiga (HaV, 2017b). Särskilt i det senare fallet lyfter författarna fram att tidig identifikation av klimatförändringseffekter kan underlätta samhällsplanering.

Vad gäller praktisk relevans av teorin sägs att SDM-ansatser kan ge information om hur artutbredning förväntas ändras, även om det finns risk för underskattning av förflyttningshastigheten hos arter. Vidare påpekas att det finns svårigheter i att skydda biologisk mångfald, i syfte att säkerställa resiliens, på grund av utmaningar i att ta hänsyn till olika typer av osäkerhet i klimatprojektioner och interaktioner i ekosystemet (HaV, 2017b). Det betonas också att resiliens fokuserar på stabiliteten i ekosystemets *funktion*, snarare än på bevarande av vissa arter eller särskilda ekosystem. Vad gäller refuger påpekas att arter riskerar att fångas norrut i Östersjön då det saknas lämpliga miljöer att flytta till i ett ändrat klimat. Slutligen nämns också att invasiva arter kan väntas bli ett ökande inslag i Östersjön som en indirekt effekt av klimatförändringar, i och med öppnandet av en nordlig sjöväg mellan Europa och Asien (HaV, 2017b). Eftersom denna sjöväg är både kortare och kallare än de nuvarande rutterna genom ekvatoriella vatten så förväntas främmande arter ha större möjlighet att överleva i barlasttankar på vägen mellan olika havsområden.

I en något äldre rapport sammanfattade Rolff & Nekoro (2013) det naturvetenskapliga kunskapsläget vad gäller övergödning, miljögifter, klimatförändringar och havsförsurning, fisk och fiske, biologisk mångfald, inklusive genetisk mångfald och främmande arter, samt födovävsinteraktioner i Östersjön. Författarna identifierade också ett antal kunskapsluckor inom respektive område, och konstaterade att det fanns stora kunskapsluckor gällande samspelet och återkopplingarna mellan miljöproblem såsom klimatförändringar, övergödning och överfiske, samt hur dessa komplexa interaktioner kan påverka artutbredning, biologisk mångfald, näringsväven, ekosystemfunktioner och tillhandahållandet av ekosystemtjänster.

I ett mer globalt perspektiv har International Union for Conservation of Nature (IUCN) gjort en mycket omfattande sammanställning av forskning kring effekter av uppvärmning på marina organismer och ekosystem (Laffoley & Baxter, 2016). Deras slutsatser kan kort sammanfattas som att effekterna av uppvärmningen på marina ekosystem redan idag är påtagliga och att det är

angeläget att skyndsamt vidta åtgärder, men också att det krävs mycket forskning för att bättre förstå vilka effekter som kan uppstå i framtiden vid olika utsläppsscenarier.

På uppdrag av Formas har Stockholm Environment Institute (SEI) analyserat vilka forskningsbehov som finns kopplat till FN:s hållbarhetsmål 14: Life below Water (Sturesson et al., 2018). Slutsatserna relaterade till klimatförändringar i rapporten handlar mycket om kunskapsluckor i Arktis. Uppvärmningen i Arktis går fortare än det globala genomsnittet, men det finns fortfarande stora osäkerheter i vilka effekter uppvärmningen där leder till. Eftersom det är svårt och dyrt att genomföra övervakning och mätningar i Arktis är forskningen där i stor utsträckning beroende av modeller, och det finns ett behov av att samordna och förbättra observationssystem och att utveckla särskilda modeller för arktiska system. Detta gäller inte minst när det gäller havsförsurningens effekter.

7 Slutsatser

I detta avsnitt redovisas övergripande slutsatser från litteratursammanställningen. Slutsatserna är i första hand giltiga för det urval litteratur som studerats, men med avseende på Östersjöforskning är det vår bedömning att urvalet relativt väl bör spegla den marina forskningen som helhet. Forskning som undersöker påverkansfaktorer på land, till exempel hur avrinning och markanvändning kan ändras i ett varmare klimat, är dock förmodligen mindre väl representerad, liksom forskning om havsnivåhöjning.

Forskningen om hur klimatförändringar och havsförsurning påverkar haven har i särskilt stor omfattning fokuserat på hur organismer påverkas, samt hur artsammansättningen kan komma att ändras. Generellt är det framför allt två påverkansmekanismer som är vanligast i studierna: uppvärmning (både av havsvattnet, och som övergripande drivkraft) och utsötning (och även andra förändringar i salthalten).

Forskningen är helt samstämmig i att en uppvärmning av havsvattnet är att vänta under kommande århundrade och att den kommer att påverka marina ekosystem. Vad gäller förändringar i salthalt är bilden också relativt samstämmig. Även om vissa experimentella studier har använt både en minskning och en ökning av salthalten för att studera effekter på organismer, så har de modellstudier som undersökt Östersjöns utveckling fram till 2100 generellt funnit att salthalten troligtvis kommer att minska. I de mer tillförlitliga studierna med flera modeller har minskningen varit upp till 45%, medan någon ökning av betydelse inte observerats. En tydlig väntad effekt av uppvärmning och förändring i salinitet är att artsammansättningen kommer att ändras då arternas livsmiljö förändras.

Forskningen behöver övervakningsdata för att validera modeller, som sedan kan användas för att ge underlag för prognoser och scenarier för förvaltningspolitiken. Med avseende på försurning pekas det på metodologiska problem med mätningarna. Det finns osäkerheter i forskningen om huruvida övervakningen är tillräcklig.

Det är klarlagt i forskning att haven är en mycket viktig sänka för koldioxid. Forskningen är dock begränsad i fråga om hur mänsklig påverkan genom mer lokala och regionala åtgärder, såsom övergödning, fysisk påverkan och fiske, kan inverka på havens och kustbiotopernas förmåga att binda CO_2. Detta resultat kan dock bero på den sökstrategi som använts, om det är så att sådan forskning inte utförts i Östersjön eller angränsande hav. Däremot finns omfattande forskning om hur mänsklig aktivitet på global nivå, såsom utsläpp av växthusgaser och den efterföljande uppvärmningen, påverkar havens förmåga att ta upp koldioxid. Vår bedömning är att globala förändringar i havets temperatur och försurningsgrad, till följd av mänskliga utsläpp av växthusgaser, sannolikt är betydligt viktigare för havens klimatreglerande funktion än regional och lokal påverkan genom övergödning, fiske eller fysisk påverkan. Denna bedömning har vi dock inte uttryckligen funnit stöd för i forskningen, utan den baseras på en utvärdering av de frågor forskningen har fäst betydelse vid, och på de olika påverkansfaktorernas relativa räckvidd på global skala.

De marina ekosystemens resiliensen kan vara av stor betydelse för att hantera de direkta såväl som indirekta effekterna av klimatförändringar. Ett ekosystems resiliens förklaras av en mängd olika ekologiska attribut. Habitat, biodiversitet och konnektivitet är av vikt för den marina resiliensen och tas upp i flertalet av studierna. De huvudsakliga påverkansfaktorer (förutom klimatpåverkan) som negativt påverkar dessa attribut utgörs av övergödning, fiske, miljöfarliga ämnen, oljespill och främmande arter. Vad gäller kostnadseffektiva åtgärder för att minska belastningen på de attribut som bedöms av vikt för resiliensen finns mest forskning rörande åtgärder riktade mot att minska övergödning, fiske samt oljespill.

Det finns en mängd olika typer av modeller som adresserar olika marina miljöproblem. Merparten av modellerna i sammanställningen adresserar klimatförändringarnas effekter på den marina miljön, övergödning samt fisket. Det förekommer färre artiklar med modeller för att fånga effekterna av främmande arter och miljöförorenande ämnen (t.ex. läkemedel, dioxiner). Detta kan möjligen förklaras av att dessa är svåra att modellera på grund av bristande kunskap. I flertalet studier används modellerna för att ta fram prognoser eller scenarier vad gäller den framtida utvecklingen av de olika påverkansfaktorerna samt deras påverkan på den marina miljön.

Förutom klimatförändringens direkta effekter på den marina miljön har den även indirekta effekter på flera belastningsfaktorer (t.ex. övergödning och främmande arter) av betydelse för den marina miljön. Det är även viktigt att ta hänsyn till att klimatförändringarna påverkar den marina miljöns förmåga att hantera andra påverkansfaktorer (t.ex. främmande arter, övergödning, fiske). Det är därför viktigt med en horisontellt integrerad havsförvaltning. Med andra ord bör inte klimatförändringarnas effekter på den marina miljön studeras (behandlas) separat från övriga miljöproblem och påverkansfaktorer.

För att förbättra den marina miljön behöver förvaltningsstrukturer vara adaptiva och robusta när det finns osäkerheter, tröskeleffekter och risker för regimskiften. Iterativa processer, i vilka mål, åtgärder och styrmedel utvärderas med jämna mellanrum utgör en vital del av en adaptiv förvaltningsprocess. Modeller, prognoser, och scenarier som kan adressera osäkerheter, tröskeleffekter och regimskiften är av avgörande betydelse för en adaptiv och robust havsförvaltning. För en adaptiv förvaltning är det även viktigt med övervakning av det marina ekosystemets gensvar på olika typer av påverkansfaktorer för att kunna bedöma effekten av olika åtgärder och styrmedel på olika miljötillståndsmål (t.ex. minskad övergödning, ökad resiliens).

Inom arbetet med Baltic Sea Action Plan (BSAP), det Marina direktivet samt EU:s gemensamma fiskepolitik används modeller, prognoser och scenarier som beslutsunderlag i framtagandet av mål, åtgärder och i vissa fall även styrmedel. Scenarier kan användas som beslutsunderlag inom förvaltningen för att hantera osäkerheter, regimskiften, tröskeleffekter samt återkopplingsmekanismer. Det har inom forskningen utvecklats ett stort antal scenarier som direkt eller indirekt adresserar möjliga framtida tillstånd av Östersjöns marina miljö och de bakomliggande drivkrafterna och påverkansfaktorerna. Dessa kan användas eller används i vissa fall redan som underlag till havsförvaltningen.

Referenser

Agrimonde, 2009. Scenarios and Challenges for Feeding the World in 2050. Summary Report. Springer, Cham, Switzerland.

Alcamo, J., 2001. Scenarios as tools for international environmental assessment, Environmental issue report 24, Experts' corner report, Prospects and Scenarios No 5, European Environment Agency (EEA).

Al-Janabi, B., Kruse, I., Graiff, A., Karsten, U., Wahl, M., 2016a. Genotypic variation influences tolerance to warming and acidification of early life-stage Fucus vesiculosus L. (Phaeophyceae) in a seasonally fluctuating environment. Marine Biology, 163(1): 14. doi:10.1007/s00227-015-2804-8.

Al-Janabi, B. et al., 2016b. Buffering and Amplifying Interactions among OAW (Ocean Acidification & Warming) and Nutrient Enrichment on Early Life-Stage Fucus vesiculosus L. (Phaeophyceae) and Their Carry Over Effects to Hypoxia Impact. Plos One, 11(4): e0152948. doi:10.1371/journal.pone.0152948.

Almen, A.K., Brutemark, A., Jutfelt, F., Riebesell, U., Engstrom-Ost, J., 2017. Ocean acidification causes no detectable effect on swimming activity and body size in a common copepod. Hydrobiologia, 802(1): 235-243.

BACC II Author Team, 2015. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer, Cham, Switzerland.

Barton, D.N. et al., 2005. Using Bayesian network models to incorporate uncertainty in the economic analysis of pollution abatement under the Water Framework Directive. Water Science and Technology: Water Supply, 5(6): 95-104.

Basu, N.B. et al., 2010. Nutrient loads exported from managed catchments reveal emergent biogeochemical stationarity. Geophysical Research Letters, 37(23): L23404.

Bêche, L.A., Connors, P.G., Resh, V.H., Merenlender, A.M., 2009. Resilience of fishes and invertebrates to pro-longed drought in two California streams. Ecography, 32(5):778-88.

Bergen, B. et al., 2016. Acidification and warming affect prominent bacteria in two seasonal phytoplankton bloom mesocosms. Environmental Microbiology, 18(12): 4579-4595.

Berkes, F., Colding, J., Folke, C. (Eds.). 2003. Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Bernhardt, J.R., Leslie, H.M., 2013. Resilience to Climate Change in Coastal Marine Ecosystems. Annual Review of Marine Science, 5(1): 371-392. doi:10.1146/annurev-marine-121211-172411.

Bignami, S., Enochs, I.C., Manzello, D.P., Sponaugle, S., Cowen, R.K., 2013. Ocean acidification alters the otoliths of a pantropical fish species with implications for sensory function. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(18): 7366-7370.

Blenckner, T. et al., 2015. Past and future challenges in managing European seas. Ecology and Society, 20(1): 40. doi:10.5751/ES-07246-200140.

Borgel, F., Frauen, C., Neumann, T., Schimanke, S., Meier, H.E.M., 2018. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on Baltic Sea Variability. Geophysical Research Letters, 45(18): 9880-9888.

Boström, C. et al., 2014. Distribution, structure and function of Nordic eelgrass (Zostera marina) ecosystems: implications for coastal management and conservation. Aquatic Conservation., 3: 410-434.

Checkley, D.M. et al., 2009. Elevated CO_2 Enhances Otolith Growth in Young Fish. Science, 324(5935): 1683-1683.

Church, J.A. et al., 2013. Sea level change. In: Stocker, T.F. et al. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA, pp. 1137-1216.

Conley, D.J. et al., 2009. Hypoxia-Related Processes in the Baltic Sea. Environmental Science & Technology, 43(10): 3412-3420.

Côté, I.M., Darling, E.S., 2010. Rethinking ecosystem resilience in the face of climate change. PLoS Biology, 8(7): e1000438. doi:10.1371/journal.pbio.1000438.

DEHP (Department of Environment and Heritage Protection), 2012. Pictures Worth a Thousand Words: A Guide to Pictorial Conceptual Modelling. Department of Environment and Heritage Protection, Brisbane, Australia.

Dahlke, F.T. et al., 2017. Effects of ocean acidification increase embryonic sensitivity to thermal extremes in Atlantic cod, Gadus morhua. Global Change Biology, 23(4): 1499-1510.

Denman, K.L. et al., 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: Solomon, S. et al. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 499-588.

Dixson, D.L., Pratchett, M.S., Munday, P.L., 2012. Reef fishes innately distinguish predators based on olfactory cues associated with recent prey items rather than individual species. Animal Behaviour, 84(1): 45-51.

Ehlers, A., Worm, B., Reusch, T.B., 2008. Importance of genetic diversity in eelgrass Zostera marina for its resilience to global warming. Marine Ecology Progress Series, 355:1-7.

Eklöf, J.S., McMahon, K., Lavery, P.S., 2010. Effects of multiple disturbances in seagrass meadows: shading decreases resilience to grazing. Marine and Freshwater Research, 60(12):1317-27.

Elken, J., Lehmann, A., Myrberg, K., 2015. Recent change—marine circulation and stratification. In: Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer, Cham, Switzerland, pp. 131-144.

Elliott, M. et al., 2015. Force majeure: will climate change affect our ability to attain Good Environmental Status for marine biodiversity? Marine Pollution Bulletin, 95: 7-27.

Fennel, K., Testa, J.M., 2019. Biogeochemical Controls on Coastal Hypoxia. Annual Review of Marine Science, 11: 105-130.

Fischenich, C., 2008. The Application of Conceptual Models to Ecosystem Restoration. U.S. Army Corps of Engineers, Environmental Advisory Board, Washington, DC, USA.

Folke, C. et al., 2002. Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 31(5): 437-440. doi:10.1579/0044-7447-31.5.437.

Folke, C. et al., 2004. Regime Shifts, Resilience and Biodiversity in Ecosystem Management. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics., 35:557-81. doi:10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711.

Folke, C. et al., 2010. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. Ecology and Society, 15(4): 20.

Freing, A., Wallace, D.W.R., Bange, H.W., 2012. Global oceanic production of nitrous oxide. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 367: 1245-1255.

Frommel, A.Y. et al., 2011. Severe tissue damage in Atlantic cod larvae under increasing ocean acidification. Nature Climate Change, 2: 42-46.

Frommel, A.Y., Schubert, A., Piatkowski, U., Clemmesen, C., 2013. Egg and early larval stages of Baltic cod, Gadus morhua, are robust to high levels of ocean acidification. Marine Biology, 160(8): 1825-1834.

Granskog, M., Kaartokallio, H., Kuosa, H., Thomas, D.N., Vainio, J., 2006. Sea ice in the Baltic Sea - A review. Estuarine Coastal and Shelf Science, 70(1-2): 145-160.

Gunderson, L.H., Pritchard, L. (Eds.). 2002. Resilience and the behavior of large-scale ecosystems. Island press, Washington, DC, USA.

Gustafsson, B.G., 2004. Sensitivity of Baltic Sea salinity to large perturbations in climate. Climate Research, 27(3): 237-251.

Gustafsson, B.G. et al., 2012. Reconstructing the Development of Baltic Sea Eutrophication 1850-2006. Ambio, 41(6): 534-548. doi:10.1007/s13280-012-0318-x.

Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E., ter Maat, J., 2013. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. Global Environmental Change, 23:485-498. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006.

HaV, 2013a. The Baltic Sea - Our Common Treasure. Economics of Saving the Sea. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:4.

HaV, 2013b. Scenarios - BalticSTERN Background paper. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:4.

HaV, 2017a. Social analys med inriktning mot hälso- och sysselsättningseffekter av att uppnå god miljöstatus samt analys av befintliga styrmedel inom den maritima sektorn: Underlag till inledande bedömning 2018 inom Havsmiljöförordningen. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2017:18.

HaV, 2017b. Havsplanering med hänsyn till klimatförändringar. An Assessment of the Theoretical Basis, and Practical Options, for Incorporating the Effects of Projected Climate Change in Marine Spatial Planning of Swedish Waters. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2017:26.

Havenhand, J.N. et al., 2018. Ecological and functional consequences of coastal ocean acidification: Perspectives from the Baltic-Skagerrak System. Ambio. doi:10.1007/s13280-018-1110-3.

Hawkins, E., Sutton, R., 2011. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. Climate Dynamics, 37: 407-418.

Heemskerk, M., Wilson, K., Pavao-Zuckerman, M., 2003. Conceptual models as tools for communication across disciplines. Conservation Ecology, 7(3): 8.

Heymans, J.J., Mackinson, S., Sumaila, U.R., Dyck, A., Little, A., 2011. The impact of subsidies on the ecological sustainability and future profits from North Sea fisheries. Plos One, 6(5): e20239. doi:10.1371/journal.pone.0020239.

Hinrichsen, H.H. et al., 2011. Climate-driven long-term trends in Baltic Sea oxygen concentrations and the potential consequences for eastern Baltic cod (Gadus morhua). ICES Journal of Marine Science, 68(10): 2019-2028.

Hoegh-Guldberg, O. et al., 2018. Impacts of 1.5 ºC global warming on natural and human systems. In: Masson-Delmotte, V. et al. (Eds.), Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission

pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, in press.

Hordoir, R., Hoglund, A., Pemberton, P., Schimanke, S., 2018. Sensitivity of the overturning circulation of the Baltic Sea to climate change, a numerical experiment. Climate Dynamics, 50(3-4): 1425-1437.

Hughes, A.R., Stachowicz, J.J., 2004. Genetic diversity enhances the resistance of a seagrass ecosystem to disturbance. Proceedings of the National Academy of Sciences, 101: 8998-9002.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2000. Emission scenarios. a special report on Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

IPBES, 2016. Summary for policymakers of the methodological assessment of scenarios and models of biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Ferrier, S. et al. (Eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany.

Jacquet, K., Prodon, R., 2009. Measuring the postfire resilience of a bird-vegetation system: a 28-year study in a Mediterranean oak woodland. Oecologia, 161(4):801-11. doi:10.1007/s00442- 009-1422-x.

Jakimavicius, D., Kriauciuniene, J., Sarauskiene, D., 2018. Impact of climate change on the Curonian Lagoon water balance components, salinity and water temperature in the 21st century. Oceanologia, 60(3): 378-389.

Jakubowska, M., Jerzak, M., Normant, M., Burska, D., Drzazgowski, J., 2013. Effect of carbon dioxide-induced water acidification on the physiological processes of the Baltic isopod saduria entomon. Journal of Shellfish Research, 32(3): 825-834.

Jankowska, E., Michel, L.N, Lepoint, G., Włodarska-Kowalczuk, M., 2019. Stabilizing effects of seagrass meadows on coastal water benthic food webs, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 510:54-63. doi:10.1016/j.jembe.2018.10.004.

Jonsson, P.R. et al. 2018. High climate velocity and population fragmentation may constrain climate-driven range shift of the key habitat former Fucus vesiculosus. Diversity and Distributions, 892-905. doi:10.1111/ddi.12733.

Jutterström, S., Andersson, H., Omstedt, A., Malmaeus, J., 2014. Multiple stressors threatening the future of the Baltic Sea-Kattegat marine ecosystem: Implications for policy and management actions. Marine pollution bulletin, 86(1-2): 468-480.

Klimat- och sårbarhetsutredningen, 2007. Sverige inför klimatförändringarna - hot och möjligheter (SOU 2007:60). Miljödepartementet, Stockholm.

Krishnamurthy, A. et al., 2009. Impacts of increasing anthropogenic soluble iron and nitrogen deposition on ocean biogeochemistry. Global Biogeochemical Cycles, 23(3): GB3016, doi:10.1029/2008GB003440.

Lade, S. J., Tavoni A., Levin S.A., Schlüter M., 2013. Regime shifts in a social-ecological system. Theoretical Ecology 6: 359-372. doi:10.1007/s12080-013-0187-3.

Laffoley, D,. Baxter, J.M. (Eds). 2016. Explaining ocean warming: Causes, scale, effects and consequences. IUCN, Gland, Switzerland.

Laikre, L. et al., 2016. Lack of recognition of genetic biodiversity: International policy and its implementation in Baltic Sea marine protected areas. Ambio, 45: 661-680. doi:10.1007/s13280-016-0776-7.

Leigh, C. 2013. Dry-season changes in macroinvertebrate assemblages of highly seasonal rivers: responses to low flow, no flow and antecedent hydrology. Hydrobiologia, 703(1): 95-112.

Maneja, R.H. et al., 2013. Effects of ocean acidification on the calcification of otoliths of larval Atlantic cod Gadus morhua. Marine Ecology Progress Series, 477: 251-258.

Lotze, H.K., Coll, M., Magera, A.M., Waird-Page, C., Airoldi, L., 2011. Recovery of marine animal populations and ecosystems. Trends in Ecology and Evolution 26(11): 595-605.

Lontzek, T.S., Cai, Y., Judd, K.L., Lenton, T.M., 2015. Stochastic integrated assessment of climate tipping points indicates the need for strict climate policy. Nature Climate Change, 5(5), 441.

Margoluis, R., Stem, C., Salafsky, N., Brown, M., 2009. Using conceptual models as a planning and evaluation tool in conservation. Evaluation and Program Planning, 32: 138-147.

Meier, H.E.M. et al., 2011. Hypoxia in future climates: A model ensemble study for the Baltic Sea. Geophysical Research Letters, 38: L24608.

Meier, H.E.M. et al., 2012a. Comparing reconstructed past variations and future projections of the Baltic Sea ecosystem-first results from multi-model ensemble simulations. Environmental Research Letters, 7(3): 034005.

Meier, H.E.M. et al., 2012b. Impact of Climate Change on Ecological Quality Indicators and Biogeochemical Fluxes in the Baltic Sea: A Multi-Model Ensemble Study. Ambio, 41(6): 558-573.

Meier, H.E.M. et al., 2018. Assessment of Eutrophication Abatement Scenarios for the Baltic Sea by Multi-Model Ensemble Simulations. Frontiers in Marine Science, 5: 440, doi: 10.3389/fmars.2018.00440.

Meier, H.E.M., Hoglund, A., Eilola, K., Almroth-Rosell, E., 2017. Impact of accelerated future global mean sea level rise on hypoxia in the Baltic Sea. Climate Dynamics, 49(1-2): 163-172.

Meier, H.E.M., Kauker, F., 2003. Modeling decadal variability of the Baltic Sea: 2. Role of freshwater inflow and large-scale atmospheric circulation for salinity. Journal of Geophysical Research-Oceans, 108(C11): 3368.

Meier, H.E.M., Kjellstrom, E., Graham, L.P., 2006. Estimating uncertainties of projected Baltic Sea salinity in the late 21st century. Geophysical Research Letters, 33(15): L15705.

Millennium Ecosystem Assessment, 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press, Washington, DC, USA.

Munday, P.L. et al., 2009. Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(6): 1848-1852.

Munday, P.L. et al., 2010. Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(29): 12930-12934.

Murray, C.J. et al., 2019. Past, Present and Future Eutrophication Status of the Baltic Sea. Frontiers in Marine Science, 6: 2. doi:10.3389/fmars.2019.00002.

Myhre, G. et al., 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Stocker, T.F. et al. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 658-740.

National Research Council, 2010. Ocean Acidification: A National Strategy to Meet the Challenges of a Changing Ocean. The National Academies Press, Washington, DC, USA. doi:10.17226/12904.

Naturvårdsverket, 2012. Styrmedel för att nå miljökvalitetsmålen - en kartläggning. Naturvårdsverkets rapport 6415.

Nielsen, R., Hoff, A., Waldo, S., Hammarlund, C., Virtanen, J., 2019. Fishing for nutrients - economic effects of fisheries management targeting eutrophication in the Baltic Sea. Ecological Economics, 160: 156-167. doi:10.1016/j.ecolecon.2019.02.013.

Niiranen, S. et al., 2013. Combined effects of global climate change and regional ecosystem drivers on a exploited marine food web. Global Change Biology, 19: 3327-3342.

O'Leary, J.K. et al., 2017. The Resilience of Marine Ecosystems to Climatic Disturbances, BioScience, 67(3): 208-220. doi:10.1093/biosci/biw161.

Oliver, T.H. et al., 2015. Biodiversity and resilience of ecosystem functions. Trends in Ecology and Evolution, 30: 673-684.

Olsson, P., Folke, C., Berkes, F., 2004. Adaptive comanagement for building resilience in social-ecological systems. Environmental Management, 34: 75-90. doi:10.1007/s00267-003-0101-7

Orth, R. et al., 2006. A global crisis for seagrass ecosystems. Bios, 56: 987-996.

Pajusalu, L., Martin, G., Paalme, T., Pollumae, A., 2016. The effect of CO2 enrichment on net photosynthesis of the red alga Furcellaria lumbricalis in a brackish water environment. Peerj, 4: e2505. doi:10.7717/peerj.2505.

Palmer, M. et al. 2005. Standards for ecologically successful river restoration. Journal of Applied Ecology, 42(2): 208-17.

Pörtner, H.-O. et al., 2014. Ocean systems. In: Field, C.B. et al. (Eds.), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 411-484.

Rabalais, N.N., Turner, R.E., Wiseman, W.J., 2002. Gulf of Mexico Hypoxia, A.K.A. "The Dead Zone." Annual Review of Ecology and Systematics, 33: 235-263.

Raskin, P., Gallopin, G., Gutman, P., Hammond, A., Swart, R., 1998. Bending the curve: toward global sustainability. PoleStar Series Report, Stockholm Environment Institute, Stockholm.

Reusch, T.B.H. et al., 2018. The Baltic Sea as a time machine for the future coastal ocean. Science Advances, 4(5): eaar8195. doi: 10.1126/sciadv.aar8195.

Rhein, M. et al., 2013. Observations: ocean. In: Stocker, T.F. et al. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 255-316.

Rolff, C., Nekoro, M., 2013. A survey of some current trends, scientific standpoints and knowledge gaps in Baltic Sea science. Baltic Sea Centre, Stockholm University, Stockholm. Availble online [accessed 2019-05-29]: https://www.su.se/polopoly_fs/1.289168.1467205112!/menu/standard/file/Asurveyofsomecurrenttrends.pdf.

Rotmans, J., Van Asselt, M.B.A., 1997. From scenarios to visions. A long way to go. Lessons learned from two decades scenario development. Open meeting of the Human dimensions of Global Environmental Change Research Community, Laxenburg, Austria.

Rotmans, J. et al., 2000. Visions for a Sustainable Europe, Futures, 32: 809-831.

Saraiva, S. et al., 2018. Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates. Climate Dynamics: 1-19.

Scharin, H. et al., 2016. Processes for the sustainable stewardship of marine environments. Ecological Economics, 128: 55-67. doi:10.1016/j.ecolecon.2016.04.010.

Shell International, 2002. Exploring the future: people and connections. Global scenarios to 2020. Global Business Environment (PXG), Shell International Limited, London, United Kingdom. Availble online [accessed 2019-05-29]: https://www. pik-potsdam.de/avec/peyresq2005/talks/0921/leemans/literature/shell_global_scenarios.pdf.

Skudra, M., Lips, U., 2017. Characteristics and inter-annual changes in temperature, salinity and density distribution in the Gulf of Riga. Oceanologia, 59(1): 37-48.

Sommer, U., Paul, C., Moustaka-Gouni, M., 2015. Warming and Ocean Acidification Effects on Phytoplankton-From Species Shifts to Size Shifts within Species in a Mesocosm Experiment. Plos One, 10(5): e0125239. doi:10.1371/journal.pone.0125239.

Stenseth, N.C., Rouyer, T., 2008. Ecology - Destabilized fish stocks. Nature, 452: 825-826.

Stiasny, M.H. et al., 2016. Ocean Acidification Effects on Atlantic Cod Larval Survival and Recruitment to the Fished Population. Plos One, 11(8): e0155448. doi:10.1371/journal.pone.0155448.

Sturesson, A., Weitz, N., Persson, Å., 2018. SDG 14: Life below water - a review of research needs. Technical annex to the Formas report Forskning för Agenda 2030: Översikt av forskningsbehov och vägar framåt. Stockholm Environment Institute, Stockholm.

Suikkanen, S. et al., 2013. Climate Change and Eutrophication Induced Shifts in Northern Summer Plankton Communities. Plos One, 8(6): e66475.

Tedesco, T., Piroddi, C., Kämäri, M., Lynam, C., 2016. Capabilities of Baltic Sea models to assess environmental status for marine biodiversity. Marine Policy, 70: 1-12. doi: 10.1016/j.marpol.2016.04.021.

Thomsen, J., Ramesh, K., Sanders, T., Bleich, M., Melzner, F., 2018. Calcification in a marginal sea - influence of seawater Ca^{2+} and carbonate chemistry on bivalve shell formation. Biogeosciences, 15(5): 1469-1482.

Timpane-Padgham, B.L., Beechie, T., Klinger, T., 2017. A systematic review of ecological attributes that confer resilience to climate change in environmental restoration. Plos One, 12(3): e0173812. doi:10.1371/journal.pone.0173812.

Torres, M.A. et al., 2017. Food-web indicators accounting for species interactions respond to multiple pressures. Ecological Indicators, 77: 67-79.

Udovyk, O., Gilek, M., 2013. Coping with uncertainties in science-based advice informing environmental management of the Baltic Sea. Environmental Science & Policy, 29: 12-23. doi:10.1016/j.envsci.2013.01.015.

Vallina, S., Le Quéré, C., 2011. Stability of complex food webs: Resilience, resistance and the average interaction strength. Journal of Theoretical Biology, 272: 160-173.

Varjopuro, R. et al., 2014. Coping with persistent environmental problems: systemic delays in reducing eutrophication of the Baltic Sea. Ecology and Society, 19(4): 48. doi:10.5751/ES-06938-190448.

Vehmaa, A. et al., 2016. Ocean acidification challenges copepod phenotypic plasticity. Biogeosciences, 13(22): 6171-6182.

Vehmaa, A., Brutemark, A., Engstrom-Ost, J., 2012. Maternal Effects May Act as an Adaptation Mechanism for Copepods Facing pH and Temperature Changes. Plos One, 7(10): e48538. doi:10.1371/journal.pone.0048538.

Vihma, T., Haapala, J., 2009. Geophysics of sea ice in the Baltic Sea: A review. Progress in Oceanography, 80(3-4): 129-148.

Vuorinen, I. et al., 2015. Scenario simulations of future salinity and ecological consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas-implications for environmental monitoring. Ecological Indicators, 50: 196-205.

Walker, B., Meyers, J.A., 2004. Thresholds in ecological and social-ecological systems: A developing database. Ecology and Society, 9(2): 3.

Walker, B.H, Holling, C.S., Carpenter, S.R., Kinzig, A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. Ecology and Society, 9(2): 5.

Waycott, M., Duarte, C., Carruthers, T., Orth, R.J., 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106,: 12377-12381.

Werner, F.J., Graiff, A., Matthiessen, B., 2016. Temperature effects on seaweed-sustaining top-down control vary with season. Oecologia, 180(3): 889-901.

Williams, S.L., 2001. Reduced genetic diversity in eelgrass transplantations affects both population growth and individual fitness. Ecological Applications, 11(5): 1472-88.

Wise, R.M. et al., 2014. Reconceptualising adaptation to climate change as part of pathways of change and response. Global Environmental Change, 28: 325-336.

Wong, P. et al., 2014. Coastal systems and low-lying areas. In: Field, C.B. et al. (Eds.), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 361-409.

Wood, H.L., Skold, H.N., Eriksson, S.P., 2014. Health and population-dependent effects of ocean acidification on the marine isopod Idotea balthica. Marine Biology, 161(10): 2423-2431.

Wood, H.L., Sundell, K., Almroth, B.C., Skold, H.N., Eriksson, S.P., 2016. Population-dependent effects of ocean acidification. Proceedings of the Royal Society B - Biological Sciences, 283(1828): 20160163. doi:10.1098/rspb.2016.0163.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 1997. Exploring sustainable development—global scenarios 2000-2050. World Business Council for Sustainable Development, London, United Kingdom.

WWF, 2012. Counter currents: Scenarios for the Baltic Sea towards 2030.

Wulff, A. et al., 2018. Ocean acidification and desalination: climate-driven change in a Baltic Sea summer microplanktonic community. Marine Biology, 165(4): 63. doi:10.1007/s00227-018-3321-3.

Zandersen, M. et al. 2019. Shared socio-economic pathways extended for the Baltic Sea: exploring long-term environmental problems. Regional Environmental Change, 19: 1073. doi:10.1007/s10113-018-1453-0.

Zettler, M.L., Friedland, R., Gogina, M., Darr, A., 2017. Variation in benthic long-term data of transitional waters: Is interpretation more than speculation? Plos One, 12(4): e0175746. doi:10.1371/journal.pone.017574.

Öborn, I. et al., 2011. Five Scenarios for 2050 - Conditions for Agriculture and land use. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. ISBN: 978-91-576-9032-6.

Österblom, H. et al., 2007. Human induced trophic cascades and ecological regime shifts in the Baltic Sea. Ecosystems, 10: 877-889.