

Referera gärna till rapporten på följande sätt:

Drakare *et al.* 2022. Energi och miljö - Energisystemens miljöpåverkan, kurskompendium version 1.0. SLU, Vatten och miljö: Rapport 2022:9

Omslagsillustration: Wordle från kompendiets innehållsförteckning.

<http://www.wordle.net/>

Kontakt

stina.drakare@slu.se

<http://www.slu.se/vatten-miljo>

1 Innehåll

Förord.....	1
1 Introduktion	2
1.1 Miljöpåverkan av mänsklig aktivitet.....	2
1.2 Planetära gränser – vad tål naturen?.....	3
1.2.1 Största problemet - den biologiska mångfalden minskar	4
1.2.2 Röddlistning	4
1.3 Sveriges 16 miljömål.....	5
1.4 Globala mål	6
1.5 Ekosystemtjänster.....	7
1.5.1 Mälaren är värd 40 miljarder kronor varje år	8
1.6 Internationella miljökonventioner och direktiv	8
1.7 Hållbar utveckling	10
1.8 Instuderingsfrågor	10
2 Fossila bränslen och växthusgaser	11
2.1 Kol, olja, naturgas och skiffergas.....	11
2.2 Över 80 % av energikonsumtionen är från fossila bränslen.....	12
2.2.1 Kina - ett land med stort kolberoende	13
2.2.2 Tyskland – fossil andel som globala medelvärdet	13
2.2.3 Sverige – ett land med låg användning av fossila bränslen.....	14
2.2.4 Tio svenska företag som släpper ut mest koldioxid	15
2.3 Växthuseffekten	17
2.3.1 Naturlig växthuseffekt.....	17
2.3.2 Antropogen växthuseffekt.....	18
2.3.3 Egenskaper hos växthusgaser.....	20
2.4 Vanligaste växthusgaserna	21
2.4.1 Upphållstider för växthusgaser.....	22
2.4.2 Hur växthusgaser bildas naturligt.....	23
2.5 Kolets kretslopp.....	24
2.6 Hur vet man hur klimatet sett ut tidigare?	25
2.6.1 Direkta metoder.....	25
2.6.2 Indirekta metoder	26
2.6.3 Modeller	28
2.7 Klimatscenarier - framtiden	28
2.7.1 Klimatet i framtidens Sverige	29
2.8 Effekter av uppvärmning på land	29
2.8.1 Förändringar i nederbörd.....	29
2.8.2 Minskad utbredning av permafrost och glaciärer	30
2.8.3 Två sätt för arter att anpassa sig till klimatförändringar	30
2.8.4 Terrestra exempel.....	30
2.9 Effekter av uppvärmning i havet	31
2.9.1 Höjd havsnivå	31

2.9.2	Minskad utbredning av havsis.....	32
2.9.3	Stabilare termokliner ger risk för syrgasbrist på bottnar	32
2.9.4	Korallrevsblekning.....	32
2.10	Havsförsurning – en relativt nyupptäckt effekt av ökad koldioxidhalt	32
2.10.1	Havsförsurningens effekter på marina organismer	34
2.11	Åtgärder för att minska koldioxidutsläpp.....	35
2.11.1	Exempel på användningsområden för CCS	35
2.11.2	Risker med CCS.....	36
2.12	Koppling till svenska och globala mål	36
2.12.1	Svenska miljömål	36
2.12.2	FN:s globala mål	37
2.13	Instuderingsfrågor	37
3	Förbränning med fokus på svavel- och kväveförsurning.....	38
3.1	Svavel-emission och deposition i Europa och Sverige.....	38
3.2	Kväveemission och deposition i Europa och Sverige	39
3.3	Miljö kvalitetsnormer för svavel- och kväveoxider	40
3.3.1	Gränsvärden för svaveldioxid i utomhusluft.....	40
3.3.2	Gränsvärden för kvävedioxid i utomhusluft.....	41
3.4	Transformeringsprocesser	41
3.5	Våt- och torrdeposition.....	41
3.6	Svavlets kretslopp	43
3.7	Försurning av mark och vatten.....	43
3.7.1	Svavelförsurning av mark och vatten.....	43
3.7.2	Kväveförsurning av mark och vatten	45
3.7.3	Naturlig försurning.....	46
3.7.4	Vittring och jonbytesprocesser.....	47
3.7.5	Aluminium-mobilisering.....	48
3.8	Effekter av försurning på land.....	48
3.8.1	Effekter på växter.....	48
3.8.2	Effekter på marken och marklevande djur	49
3.8.3	Åtgärda genom askåterföring	49
3.9	Effekter av försurning i sjöar och vattendrag.....	51
3.9.1	Normalt pH i olika typer av sjöar och vattendrag	51
3.9.2	Försurningseffekter på djurlivet i sjöar och vattendrag	52
3.9.3	Hur görs försurningsbedömning av inlandsvatten?.....	52
3.9.4	Åtgärda genom kalkning: fördelar och nackdelar	53
3.10	Koppling till svenska och globala mål	54
3.10.1	Svenska miljömålen	54
3.10.2	FN:s globala mål	54
3.11	Instuderingsfrågor	55
4	Förbränning och problem kopplade till aerosoler och organiska miljöföroreningar.....	56
4.1	Aerosoler	56

Institutionen för vatten och miljö

4.1.1	Aerosolers kemiska sammansättning	56
4.1.2	Partiklar – PM _{2,5} och PM ₁₀	56
4.1.3	Hälsoeffekter	57
4.1.4	Miljökvalitetsnormer	57
4.1.5	Klimat effekter	58
4.2	Hur meteorologin påverkar luftföroreningar	58
4.2.1	Fem viktiga fenomen inom meteorologin som påverkar luftföroreningars effekter	59
4.2.2	Processer inblandade vid spridning av luftförorening	59
4.2.3	Sju exempel på hur kraftigt förorenad luft uppstår	62
4.3	Avfallsförbränning kräver rökgasrening	63
4.4	Vedeldning	64
4.4.1	Ofullständig förbränning leder till miljö- och hälsoeffekter ...	64
4.4.2	Hårdare krav som åtgärd – vad innebär de?	65
4.5	Hydraulisk spräckning för att utvinna naturgas	65
4.6	Organiska miljöföroreningar	67
4.6.1	Flyktiga organiska ämnen	67
4.6.2	Långlivade organiska föreningar	69
4.7	Oljeutsläpp i vatten	70
4.7.1	Effekter på djur som kommer i kontakt med olja	71
4.7.2	Nedbrytningstid vid oljeutsläpp	71
4.7.3	Oljesaneringsmetoder	71
4.8	Koppling till svenska och globala mål	72
4.8.1	Svenska miljömålen	72
4.8.2	FN:s globala mål	72
4.9	Instuderingsfrågor	73
5	Biobränslen – med fokus på övergödning och ozon	74
5.1	Olika typer av biobränslen	74
5.1.1	Vanligaste biobränslet är skogsbränsle	74
5.1.2	Torv – fossilt eller förnybart?	75
5.1.3	Etanol	75
5.1.4	Biogas	76
5.1.5	Biodiesel	76
5.1.6	Andra energigrödor	77
5.1.7	Biobränslen som växer i vatten	77
5.2	Kväveutsläpp kopplade till biobränslen	78
5.2.1	Utsläpp av kväveoxider är ett problem vid förbränning – biobränslen är inget undantag	78
5.2.2	Åtgärder i kraftvärmeverk för att minska NO _x	79
5.2.3	Vid odling av biobränslen läcker kväve till vatten	79
5.2.4	Gruvor - en relativt stor kvävekälla i Norrlandsälvar	80
5.2.5	Effekter av övergödning i vatten och mark	80
5.2.6	Åtgärder för att minska kväveutsläpp i vatten	81
5.3	Kväveutsläpp och marknära ozon	81
5.3.1	Miljökvalitetsnormer för ozon	82

5.3.2	Hälsoeffekter av marknära ozon	82
5.3.3	Effekter av marknära ozon på växter	83
5.4	Ozonet i stratosfären – roll och trender	84
5.5	Metallutsläpp vid förbränning	84
5.6	Hur klimatsmarta är biobränslen? Tidsaspekten	85
5.7	Skogen som kolsänka och kolförråd	85
5.8	Marken som källa eller sänka för växthusgaser	86
5.9	Risk att förlora biologisk mångfald.....	86
5.10	Koppling till svenska och globala mål	86
5.10.1	Svenska miljömålen	86
5.10.2	FN:s globala mål	87
5.11	Instuderingsfrågor	87
6	Vattenkraft och dess miljöpåverkan.....	89
6.1	”Råvarutillgång” och länder som utnyttjar och vill utnyttja vattenkraft	89
6.2	Vattenkraft i Sverige – småskaligt till storskaligt	90
6.3	Effekter när man översvämmar mark vid dammbygget	91
6.3.1	Växthusgasutsläpp vid kraftverksdammar	91
6.3.2	Minskad biologisk mångfald i dammens strandzon	92
6.3.3	Kvicksilver	92
6.4	Dammen som vandringshinder.....	93
6.4.1	Barriäreffektens påverkan på fiskar	93
6.4.2	Konsekvenser i biotopen	93
6.4.3	Andra effekter	94
6.4.4	Flodpärlmusslan	94
6.4.5	Exempel från andra länder	95
6.4.6	Faunapassage - en åtgärd för att minska barriären	95
6.4.7	Djurvänligare turbiner och galler	95
6.5	Hur dammens reglering påverkar strandzonen i dammen	96
6.6	Sedimentation och näringsutarmning	97
6.6.1	Exempel på näringsutarmning.....	97
6.7	Uttorkade flodfåror nedströms kraftverksdammar	98
6.7.1	Åtgärda torrflöden – minimiflöde.....	99
6.8	Problematik när vattenkraft konkurrerar med matproduktion.....	100
6.9	Koppling till svenska och globala mål	101
6.10	Instuderingsfrågor	102
7	Kärnkraftens miljöpåverkan	103
7.1	Kärnbränsle	103
7.1.1	Uran.....	103
7.1.2	Torium.....	104
7.1.3	Utvinning av uran.....	104
7.1.4	Råvarutillgång	106
7.2	Transporter kopplade till kärnkraft.....	108
7.2.1	Det svenska systemet	108

7.2.2	Regler och risker för transporterna	109
7.3	Miljöeffekter vid drift - kylvatten	110
7.3.1	Exemplet Frankrike - kärnkraftverk vid floder	110
7.3.2	Exemplet Sverige - Kärnkraftverk vid kusten.....	111
7.4	Slutförvar.....	111
7.4.1	Deponering.....	111
7.4.2	Slutförvar	112
7.4.3	Koldioxidutsläpp.....	114
7.4.4	Risker	114
7.4.5	Alternativa metoder för kärnavfall.....	114
7.5	Olyckor vid kärnkraftverk.....	115
7.5.1	Fukushima-olyckan.....	115
7.5.2	Tjernobyl-olyckan.....	117
7.6	Miljö- och hälsorisker av radioaktiva ämnen	118
7.6.1	Strålning.....	118
7.6.2	Radioekologi	119
7.6.3	Cesium-137	119
7.6.4	Konsekvenser av Tjernobylolyckan.....	120
7.6.5	Hälsoeffekter efter Tjernobyl- och Fukushima-olyckan	121
7.7	Avveckling av kärnkraft.....	122
7.7.1	Bakgrund.....	122
7.7.2	Utmaningar och påverkan på miljön.....	122
7.8	Koppling till svenska och globala mål	123
7.8.1	Svenska miljömålen	123
7.8.2	FN:s globala mål	124
7.9	Instuderingsfrågor	124
8	Vind- och vågkrafts miljöpåverkan	125
8.1	Miljöpåverkan från råvaror till våg- och vindkraft	125
8.1.1	Generellt.....	125
8.1.2	Generatorer.....	125
8.2	I vilken typ av miljö är vindförhållandena optimala för vindkraft?	127
8.3	I vilken typ av miljö är det bäst vågor för vågkraft?	128
8.4	Vågkraftens miljöeffekter	128
8.4.1	Störningar vid installationen	128
8.4.2	Hydrodynamiska förändringar	129
8.4.3	Artificiella rev skapas	129
8.4.4	Effekter från ljud i drift.....	129
8.4.5	Effekter från elektromagnetism.....	130
8.4.6	Påverkan på fiskemöjligheter - "No take zone"	130
8.5	Havsbaserade vindkraftverk.....	131
8.5.1	Miljöeffekter vid anläggning.....	131
8.5.2	Ljud under konstruktionsfas.....	131
8.5.3	Artificiella rev och sedimentation.....	132
8.5.4	Naturligt naturreservat	133
8.5.5	Miljöeffekter vid drift	133

8.5.6	Är många små verk bättre än få stora?	135
8.6	Landbaserade vindkraftverk	135
8.6.1	Effekter av vindkraftverk vid placering i fjällen	135
8.6.2	Effekter av vindkraftverk vid placering i skogs- och jordbrukslandskap	138
8.7	Koppling till svenska och globala mål	140
8.7.1	Svenska miljömålen	140
8.7.2	FN:s globala mål	141
8.8	Instuderingsfrågor	142
9	Solkraft, geotermisk energi och energilagring	144
9.1	Solceller	144
9.1.1	Typer av solceller	144
9.1.2	Råvarutillgång och miljöpåverkan	145
9.1.3	I vilka områden är det optimalt för solceller?	146
9.2	Solkraftverk – termisk solkraft	146
9.2.1	Termisk solkrafts miljöpåverkan	147
9.3	Geoenergi och geotermisk energi	147
9.3.1	Användningsområden för geoenergi	148
9.3.2	Miljöpåverkan vid geotermisk energiutvinning	148
9.4	Lagring av energi	149
9.4.1	Elektriska ackumulatorer	150
9.4.2	Icke-elektriska ackumulatorer	155
9.5	Elvägar - alternativ till energilagring	158
9.6	Avfall och återvinning	158
9.6.1	Solceller	158
9.6.2	Batterier	159
9.7	Gruvdriftens miljöpåverkan - LCA	160
9.8	Koppling till svenska och globala mål	161
9.8.1	Svenska miljömålen	161
9.8.2	FN:s globala mål	162
9.9	Instuderingsfrågor	163
	Referenslista	164

Förord

Under flera års tid har studenterna önskat sig kurslitteratur till kursen energisystemens miljöpåverkan, något som är svårt att hitta en sammanhängande bok om då ämnesområdet är stort och ganska spretigt. Nu har vi skrivit ett kurskompendium med hjälp av studenterna för att ha något som täcker in stora delar av vad som brukar tas upp på kursens föreläsningar. Kompendiet provanvändes under några kurser för att se att omfattningen var den rätta innan den nu publiceras som en öppet tillgänglig rapport.

Kurskompendiet skrevs av de studenter som gick kursen Energisystemens miljöpåverkan på SLU hösten 2018. Detta gjordes i form av åtta grupparbeten där varje grupp ansvarade för ett kapitel. Kursansvarig lärare Stina Drakare sammanställde allt till ett kompendium och gjorde i samband med detta en grovredigering samt la till ett inledande kapitel. Stina Drakare har senare i detalj faktagranskat kompendiet. Faktagranskning har också gjorts av övriga lärare på kursen: Torbjörn Nilsson (SLU), Monica Mårtensson (Uppsala universitet), Corine Sandström (SLU), Sabine Jordan (SLU) och Stephan Köhler (SLU).

Författare till de olika kapitlen är:

- Kapitel 1: Stina Drakare
- Kapitel 2: Kim By, Sonja Byström Winning, Tim Gyulanszky, Karl Malmberg, Katja Orrenius, Kajsa Paulsson, Tor Thomsson, Christine Timm, Torbjörn Nilsson
- Kapitel 3: Judith Bösenecker, Jonatan Hultin Rosenberg, Johanna Lenárd, Jessica Redander Jennifer Suuronen, Joacim Toivonen.
- Kapitel 4: Rikard Ansander, Oliver Christiansson, Patrick Johansson, Simon Johansson, Philip Lundquist, Sebastian Söderström
- Kapitel 5: Niklas Ahlm, Jonas Backéus, Marcus Blomberg, Viktor Helleday, Marcus Segelsjö Duvernoy, Michal Stanowski, Niclas Uskali
- Kapitel 6: Agata Absalyamova, Amanda Daniels, Alice Karlsson, Alma Nordqvist, Anton Öberg
- Kapitel 7: Gustav Larsson, Torun Moberg, Joakim Nyberg, Louise Persson, Hanna Rangstedt Canholm, Anton Thorstensson
- Kapitel 8: Emil Arvidsson, David Bergkvist, Filip Breitholtz, Erik Edström, Felix Eriksson, Fredrik Nordström
- Kapitel 9: Lovisa Forsell, Hanna Lillestöl, Viktor Olsson, Gustav Södergren

1 Introduktion

Energien vi använder oss av kommer både globalt och nationellt från flera olika källor, vilket gör att den miljöpåverkan som sker också blir av olika typ. Detta kompendium fokuserar på miljöpåverkan som är kopplad till energiproduktion och energianvändning för att synliggöra problemen, effekterna, åtgärdsbehov och kommande utmaningar för att minska miljöpåverkan från dessa. Detta för att öka kunskapen hos studenterna så att de kan vara med och ta fram tekniker och metoder för förbättrade energisystem för en hållbar energiproduktion och energianvändning i framtiden. Som inledning till följande kapitel handlar detta första kapitel om de stora miljöproblem som finns och vilka av dem som kan kopplas till energisektorn. Här finns kortfattade presentationer av svenska och internationella mål, begreppen ekosystemtjänster och hållbar utveckling samt exempel på internationella miljökonventioner och direktiv som hjälper till att minska miljöpåverkan i stor skala.

1.1 Miljöpåverkan av mänsklig aktivitet

När Naturvårdsverket listar den miljöpåverkan som kopplas till mänsklig aktivitet delar de upp den i fysisk påverkan och utsläpp (Naturvårdsverket 2001):

Fysisk påverkan:

1. Arters obalans: Jakt, fiske och icke-inhemska arter
2. Minskad mångfald i skogs- och jordbrukslandskapen
3. Vegetationsskador och förändring av markens struktur
4. Asfalt och betong: Permanenta landskapsförändringar
5. Påverkan på vattencykeln: Dammar, diken och tunnlar
6. Förbrukande av ändliga resurser

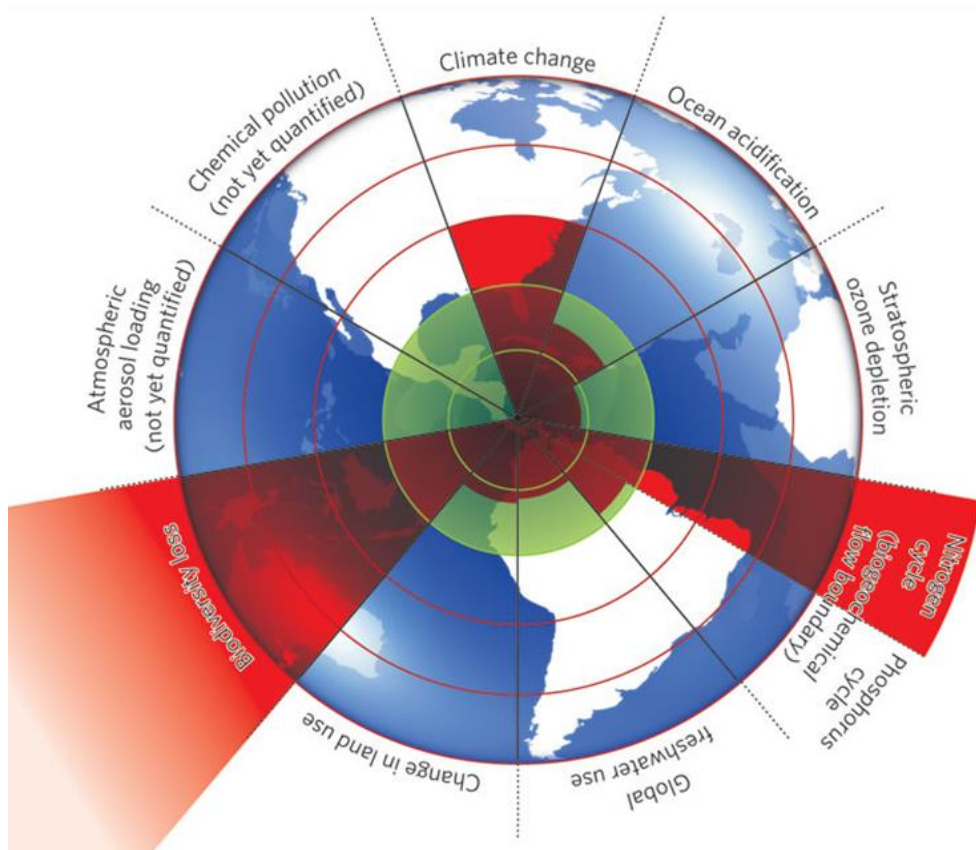
Utsläpp:

1. Olja, kemikalier och avfall
2. Försurning av mark och vatten
3. Övergödning
4. Tungmetaller
5. Persistenta organiska föroreningar (POPs)
6. Radioaktiva utsläpp och kärnavfall
7. Förtunning av ozonlagret
8. Klimatförändringar

Kombinationer av flera miljöproblem är också vanliga. Från denna lista ser man att det mesta går att koppla till energiproduktion och användning. Det är bara den allra första punkten med arters obalans pga jakt och fiske som inte har tydlig koppling även om de strukturer som t.ex. används vid vattenkraft påverkar artsammansättningen i de älvar som dämmts upp. Flera av påverkanstyperna behandlas i detta kurskompendium – hur de uppkommer och vilka energislag eller processer de är kopplade till.

1.2 Planetära gränser – vad tål naturen?

Ett annat sätt att presentera miljöpåverkan är att jämföra påverkan med vad naturen tål. Naturen har ju en förmåga att kunna buffra för väldigt mycket påverkan utan att ändra sig alltför mycket och när vi går över den gränsen kanske det är för sent. Johan Rockström har i samarbete med ett stort antal forskare från olika discipliner gjort just beräkningar på vad jorden tål för att uppmärksamma vad vi bör fokusera på vad gäller miljöproblem. I en Nature-artikel från 2009 presenterade de nio olika typer av miljöproblem och kvantifierade sju av dem (Rockström *et al.* 2009). Artikeln fick stor genomslagskraft och tårtdiagrammet med jorden i bakgrunden visar att för tre områden överstiger påverkan vad jorden tål: **att arter dör ut, kväveutsläpp och det varmare klimatet** (Figur 1). Ett varmare klimat kommer alltså på tredje plats när utvärderingen gjordes 2009. Övriga områden som togs upp var: förändrad markanvändning, användning av sötvatten, ozonlagrets förtunning, havsförsurning, kemiska utsläpp och aerosolutsläpp.



Figur 1. Beyond the boundary. Källa: Rockström *et al.* 2009.

Tårtdiagrammet uppdaterades 2015 och då visade man att även för **fosfor** överskrider utsläppen vad planeten tål (Steffen *et al.* 2015). Endast för parametrarna sötvattensanvändning, havsförsurning och ozonlagrets förtunning är man fortfarande på den säkra sidan. Vid en jämförelse med innehållsförteckningen till detta kompendium ser man att vi kommer att behandla de flesta av miljöproblemen som tas upp i tårtdiagrammet.

1.2.1 Största problemet - den biologiska mångfalden minskar

Flera studier visar att arter dör ut i en alltför snabb takt. Man kan då fråga sig varför det är viktigt att bevara biologisk mångfald. Den biologiska mångfalden är resultatet av en långsam process. Den är resultatet av 4 miljarder år av evolution. Denna mångfald är inte lätt att ersätta om den går förlorad. Ett sätt att se på risken med en förlorad mångfald är att anta att alla arter har en specifik roll i ekosystemet. Tar man då bort en del av kedjan blir hela systemet svagare och fungerar sämre. Ett annat sätt att se på det är att olika arter är olika viktiga. Då kan man inrikta sig på att bevara de som är viktigast för systemets överlevnad. Men eftersom funktionen av enskilda arter ofta är dåligt känd kan det ändå vara bra att använda sig av försiktighetsprincipen. Alltså att bevara så mycket som möjligt för säkerhets skull.

Vad är biologisk mångfald?

Begreppet lanserades i USA i mitten av 1980-talet och inkluderar:

1. Mångfald av ekosystem – både olika naturtyper (habitat) och ålder och struktur inom en naturtyp
2. Mångfald av arter
3. Genetisk mångfald – hög genetisk mångfald inom en art ökar chansen till överlevnad vid förändringar.

Man delar in mångfald i tre skalor för att det just är i flera skalor det finns behov av att förstärka bevarandeåtgärder om de ska fungera. Finns det inte rätt natur för en art att leva i kommer förstås inte arten att överleva särskilt länge. Den behöver förutsättningar för födosök, skydd mot predatorer och möjligheter att reproducera sig. Med många olika habitat på jorden och ett bra nätverk mellan liknande habitat (som minskar risken för inavel om organismer kan ta sig mellan dessa) ökar möjligheten för arter att fortleva i livskraftiga bestånd. Den genetiska mångfalden behöver också vara tillräcklig. För arter eller populationer som varit nära att utrotas och klarat av att överleva syns det tydligt i deras genetiska mångfald att den minskat, det kallas flaskhalseffekten. Det gäller t.ex. den svenska vargstammen som härstammar från endast fem invandrade vargar från den finskryska populationen och därmed är mycket inavlade (Naturvårdsverket 2018). Arter eller populationer med liten genetisk mångfald är oftast extra känsliga för förändringar i miljön eftersom en massa möjliga anpassningar inte längre finns bevarade genetiskt hos dem.

1.2.2 Rödlisning

Rödlistan är en klassificering av arter efter att man bedömt deras utdöenderisk och är ett viktigt redskap för att bedöma vilka arter som är hotade. I Sverige tas rödlistan fram av ArtDatabanken på uppdrag av Naturvårdsverket. Rödlistan revideras

vart 5:e år. Naturvårdsverket utarbetar åtgärdsprogram och förvaltningsplaner utifrån bedömningarna. Det finns åtta kategorier i den internationella rödlistan (se www.iucnredlist.org), där två av kategorierna inte är hotade (Tabell 1). De två kategorierna heter ”livskraftig” och ”nära hotad” och används för att följa trender hos icke hotade arter. På internationella rödlistan kan man göra sökningar utifrån olika hotbilder. I juni 2019, hade listan totalt cirka 98 000 arter listade varav ca 28 000 var hotade. I Sverige är 75 arter rödlistade och exempel på anledningar är att 13 arter är hotade pga energiproduktion och gruvsdrift, 14 arter pga transporter och servicekorridorer, 34 arter pga utsläpp av olika slag och 23 arter är hotade pga klimatförändringar och extremväder. Rödlistans sökmotor via webbsidan www.iucnredlist.org är ett snabbt och enkelt sätt att ringa in hotbilder för olika arter.

Tabell 1. Kategorier i den internationella rödlistan för hotade arter samt antalet arter som är hotade (Källa: www.iucnredlist.org). Grön markering visar de kategorier som inte är hotade.

Red list category	Beskrivning	Antal arter per kategori (2019-07-03)
EX	Extinct	872
EW	Extinct in the wild	69
CR	Critically endangered	5914
EN	Endangered	9175
VU	Vulnerable	12070
LR/cd	Lower risk: Conservation dependent	208
NT eller LR/nt	Near Threatened (nära hotad)	6187
LC eller LR/lc	Least Concerned (livskraftig)	48802
DD	Data Deficient	15215
Totalt hotade		28308
Totalt undersökta		98512

1.3 Sveriges 16 miljömål

Sverige beslutade att jobba med miljöproblemen via ett miljömålssystem för en hållbar samhällsutveckling redan 1999 då 15 mål sattes upp för att styra miljöarbetet i Sverige och visa vägen till ett hållbart samhälle. Det 16:e målet om ett rikt växt- och djurliv tillkom 2005 för att styra upp just problemet med att arter dör ut. De 16 målen är följande:

1. Begränsad klimatpåverkan
2. Frisk luft
3. Bara naturlig försurning
4. Giftfri miljö
5. Skyddande ozonskikt
6. Säker strålmiljö
7. Ingen övergödning
8. Levande sjöar och vattendrag
9. Grundvatten av god kvalitet

10. Hav i balans samt levande kust och skärgård
11. Myllrande våtmarker
12. Levande skogar
13. Ett rikt odlingslandskap
14. Storslagen fjällmiljö
15. God bebyggd miljö
16. Ett rikt växt och djurliv

Över de 16 målen finns ett större generationsmål som lyder:

”Det övergripande målet för miljöpolitiken är att till nästa generation lämna över ett samhälle där de stora miljöproblemen är lösta, utan att orsaka ökade miljö- och hälsoproblem utanför Sveriges gränser.”

På senare har man också lagt till etappmål inom olika områden för att fokusera arbetet inom områdena avfall, klimatpåverkan, biologisk mångfald, farliga ämnen, hållbar stadsutveckling och luftföroreningar. Varje miljömål har också preciseringar och indikatorer för att kunna bedöma hur olika delar av målen utvecklas.

För att kunna nå generationsmålet och miljömålen krävs en ambitiös miljöpolitik i Sverige, inom EU och i internationella sammanhang. Målen följs upp varje år av olika myndigheter och fördjupade utvärderingar görs vart 4:e år. När miljömålen först togs fram var målet att de alla utom klimatmålet skulle nås till år 2020. Klimatmålet fick till år 2050 på sig. Vid revideringar har dock tidsplanen behövt justeras framåt för de flesta av dem. I nuläget är det bara målet ett Skyddande ozonskikt som är nått och Säker strålmiljö som är nära att nås (Naturvårdsverket 2015). Övriga 14 mål nås inte till år 2020 även om utvecklingen är positiv för flera av dem. I slutet av varje kapitel i detta kurskompendium diskuteras vilka olika energislags miljöpåverkan som tydligast kopplar till de vart och ett av de svenska miljömålen.

1.4 Globala mål

Inom FN jobbar man också för en bättre miljö för alla. FN använder sig av 15-års intervall i sitt arbete. År 2000 beslöt FN:s generalsekreterare Kofi Annan att man skulle göra en stor utvärdering av hur naturen mår och vad vi behöver naturen till (Millenium Ecosystem Assessment 2005) där år 2005-2015 användes till att ta fram de 17 globala mål som beslutades år 2015 i FN med förhoppning om att nå dem alla till år 2030 (www.globalamalen.se). Eftersom det är svårt att nå ett hållbart samhälle med fattigdom, hunger, sjukdomar eller utan utbildning och jämställdhet fokuserar de första målen på just detta. Övriga mål liknar mer de svenska med fokus på vissa miljöproblem, habitat eller sektorer av samhället. Sverige är just nu i en fas där vi inkorporerar flera av de globala målen i de svenska miljömålen.

Här listas FN:s globala mål för hållbarutveckling:

1. Ingen fattigdom
2. Ingen hunger
3. Hälsa och välbefinnande
4. God utbildning för alla
5. Jämställdhet
6. Rent vatten och sanitet
7. Hållbar energi för alla
8. Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt
9. Hållbar industri och infrastruktur
10. Minskad ojämlikhet
11. Hållbara städer och samhällen
12. Hållbar konsumtion och produktion
13. Bekämpa klimatförändringen
14. Hav och marina resurser
15. Ekosystem och biologisk mångfald
16. Fredliga och inkluderande samhällen
17. Genomförande och globalt partnerskap

Flera av dessa mål angränsar till energiproduktion och energianvändning och särskilt mål 7 om hållbar energi för alla där man till 2030 bland annat:

- vill säkerställa allmän tillgång till ekonomiskt överkomliga, tillförlitliga och moderna energitjänster,
- väsentligen vill öka andelen förnybar energi i den globala energimixen och vill fördubbla den globala förbättringstakten vad gäller energieffektivitet

Även för de globala målen diskuteras i slutet av varje kapitel i kompendiet hur de kopplar till olika energislag och typer av utsläpp och miljöpåverkan.

1.5 Ekosystemtjänster

Det var det internationella forskningsprogrammet Millennium Ecosystem Assessment (2005) som tydliggjorde hur viktig naturen är för människan genom att dela upp de ekosystemtjänster som naturen bidrar med i fyra kategorier. Utmaningen är att samarbeta med naturen för att dra nytta av dessa tjänster för ett optimalt användande av resurser och därmed en minskad miljöpåverkan. Kortfattat kan man beskriva dem enligt följande:

- **Stödjande tjänster:** dessa tjänster stödjer övriga ekosystem tjänster med t.ex. näringscykler, vattencykeln, fotosyntes etc.
- **Försörjande tjänster:** Produkter som naturen ger som ved, virke, mat, gödsel, rent vatten eller energi från vatten, sol och vind.

- **Reglerande tjänster:** Naturen hjälper till att reglera processer som kolupptag i växter, klimatreglering, nedbrytning av avfall, rening av vatten i våtmarker, rening av luft och sjukdomshantering.
- **Kulturella tjänster:** Att naturen kan ge andliga upplevelser, kognitiv utveckling, rekreation och estetiska upplevelser.

Eftersom naturens ekosystemtjänster är gratis när de fungerar måste man beräkna vad de är värda på ett indirekt sätt. Alltså vad vi måste ersätta dessa tjänster med för att få samma tjänst gjord när inte naturen klarar av det själv längre.

1.5.1 Mälaren är värd 40 miljarder kronor varje år

För Mälaren har man på Chalmers gjort en analys av vilka ekosystemtjänster sjön står för och vad de är värda för att kunna få en förståelse för de åtgärder som behövs för att sjön fortsatt ska kunna erbjuda dessa tjänster (Morrison 2009). Några exempel:

- Dricksvatten – 2 miljarder per år
- Badplatser – 3 miljarder per år. Om 10 möjliga baddagar förstörs med algblomning minskas värdet med 500 miljoner.
- Utsikt (fastighetsvärde) – miljardklass
- Yrkesfiske – 10 miljoner per år
- Gräsade skyddszoner som fångar N och P – 30 miljoner per år
- Våtmarker som ökar biodiversitet, är koldioxidsänkor och fångar N och P – 100 miljoner per år
- Skridskoåkning på sjön – 40 miljoner per år (extra kostnader för ishallar om isfria vintrar)

På liknande sätt kan man beräkna värdet av andra naturområden att ha som stöd för olika typer av kommunala beslut, vilket har blivit vanligare numera.

1.6 Internationella miljökonventioner och direktiv

Sverige har anslutit sig till ett 40-tal internationella miljökonventioner och några exempel på sådana som kopplar till energi och miljö är (källa Naturvårdsverket):

- **Luftvårdskonventionen**, Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP). Den undertecknades 1979 och trädde i kraft 1983. Bakgrunden är forskning som visade att luftföroreningar transporteras över långa avstånd och faller ner på annan plats än var de släpptes ut. Det gjorde att man insåg behovet av internationellt samarbete för att minska såväl utsläpp som miljöeffekter av dessa. Det är en regional konvention för Europa, USA, Kanada samt länderna i Kaukasus och Centralasien. Exempel på vad denna innebär beskrivs mer utförligt för utvalda ämnen i kapitel 3 och 4.

- **Klimatkonventionen**, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Den undertecknades vid FN:s konferens om miljö och utveckling i Rio 1992 och trädde i kraft 1994. Parisavtalet som beslutades i december 2015 med målet att den globala uppvärmningen ska hållas under 2 grader, men helst under 1,5 grad. Klimatproblematiken tas upp mer i kapitel 2.
- **Stockholmskonventionen**, Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. En global miljö- och hälsoskyddskonvention för att skydda mot långlivade organiska föroreningar (Persistent Organic Pollutants, POPs) som undertecknades 2001 och trädde i kraft 2004. De 179 ingående länderna ska göra planer för att begränsa eller helt få bort utsläpp av POPs. Kompendiet behandlar POPs i kapitel 4.
- **Ramsarkonventionen**, Convention on Wetlands of International Importance, especially Waterfowl Habitats, undertecknades 1971 och trädde i kraft 1975 och var då den första moderna konventionen inom naturvården. Det är en fristående konvention som inte tillhör FN-systemet. Världens naturliga våtmarker och vattenmiljöer är värdefulla för mat- och vattenförsörjning samt vattenrening och kolinlagring. Världens våtmarker bidrar med tjänster och produkter för ca 10 biljoner kronor. Trots detta förstörs och skadas de när mark behövs för andra ändamål. Varje medlemsland åtar sig att bevara minst ett område av internationell betydelse, ett så kallat Ramsarområde. Sverige har 68 Ramsarområden, där flera är kända flyttfågellokalerna som Ottenby, Hornborgasjön och Hjälstaviken medan andra är mer kopplade till fiskelokalerna som Emån, Vindelälven eller Umeälvens delta, där de senare är energimässigt är tydligt kopplade till vattenkraftpåverkan.

Eftersom miljöproblem oftast inte bryr sig om landsgränser är ett aktivt miljöarbete inom EU en förutsättning för att vi ska kunna nå de svenska miljömålen. Varje medlemsland bidrar med kunskapsunderlag till den Europeiska miljöbyrån, EEA, så att varje medlemsland också kan nyttja grannländernas kunskapsunderlag i sitt miljöarbete. EU:s medlemsstater behöver följa EU:s lagar som oftast kallas direktiv och som sedan implementeras i varje land, i Sverige genom att bli svenska lagar och inom miljöområdet främst via miljöbalken. Det finns massor av direktiv inom miljöområdet några exempel är:

För att skydda arter och deras habitat:

- Art- och habitatdirektivet (92/43/EEG)
- Fågeldirektivet (2009/147/EG)
- Vattendirektivet (2000/60/EG)
- Havsmiljödirektivet (2008/56/EG)

För att minska utsläpp, avfall och gynna cirkulär ekonomi:

- Nitratdirektivet (91/676/EEG)
- Avfallsdirektivet (2008/98/EG),

- Direktivet om avfall som utgörs av eller innehåller elektrisk och elektronisk utrustning (2012/19/EU),
- Direktivet om batterier och ackumulatorer (2006/66/EG)
- Direktivet om uttjänade fordon (2000/53/EG).
- Direktiv om buller (2002/49/EG)
- TAK-direktivet (2016/2284) – reglerar utsläpp av svaveldioxid, kväveoxider, flyktiga organiska ämnen, ammoniak och små partiklar (PM_{2,5})

1.7 Hållbar utveckling

Det engelska begreppet är **sustainable development** och begreppet beskrevs första gången 1987 av Brundtland-kommissionen som tillsattes av FN. Kommissionen skrev rapporten ”Vår gemensamma framtid” för att förbereda för världskonferensen om miljö och utveckling i Rio de Janeiro 1992. De beskrev hållbar utveckling som:

”utveckling som möter nutidens behov utan att riskera möjligheten för kommande generationer att möta sina behov”

Formuleringen användes för att formulera det svenska generationsmålet för miljö-kvalitetsmålen (se sid 7). När det gäller energisystem, och särskilt när man utvecklar nya tekniker och metoder gäller det att verkligen försöka få med alla miljöbehov så att det blir långsiktigt hållbart. En svår men viktig utmaning!

1.8 Instuderingsfrågor

- Vilka tre typer av miljöproblem överstiger vad jorden tål? Fundera på hur de är relaterade till energirelaterade aktiviteter.
- Vilka svenska miljömål är uppnådda?
- Det finns tre typer av biologisk mångfald. Vilka är de och varför delar man in dem i dessa tre sätt?
- Vad innebär att en art är rödlistad?
- Ge exempel på tre ekosystemtjänster och ange vilken av de fyra ekosystemtjänstkategorierna de tillhör.
- Vad innebär begreppet hållbar utveckling?

2 Fossila bränslen och växthusgaser

Definitionen av fossila bränslen är bränslen som består av olika typer av väte- och kolföreningar och som utvinns ur berggrunden. Ekonomiskt sett är **kol**, **olja** och **naturgas** de viktigaste (Nationalencyklopedin 2018a). De fossila bränslena har sitt ursprung i organiskt material som sedimenterats och omvandlats genom att utsättas för hög temperatur och högt tryck under miljontals år. Eftersom nybildningsprocessen är betydligt långsammare än utvinningstakten minskar tillgången, vilket gör att fossila bränslen räknas som en ändlig resurs (Energimyndigheten 2009). Detta första kapitel behandlar fossila bränslen med växthusgasproblematiken i fokus. Senare kapitel tar vi upp andra typer av miljöpåverkan från fossila bränslen.

2.1 Kol, olja, naturgas och skiffergas

Det finns olika grader av kolhalt hos **kol** beroende på hur hög temperatur det utsatts för: brunkol, stenkol och antracit (Nationalencyklopedin 2018b). Brunkol och stenkol används oftast i kolkraftverk. Förutom att kolkraftverk släpper ut stora mängder koldioxid innebär brytningen av kol också stora ingrepp i naturen (Vattenfall 2016). Vad gäller utsläpp av koldioxid medför förbränning av kol större utsläpp per energienhet än oljeprodukter (Naturvårdsverket 2017).

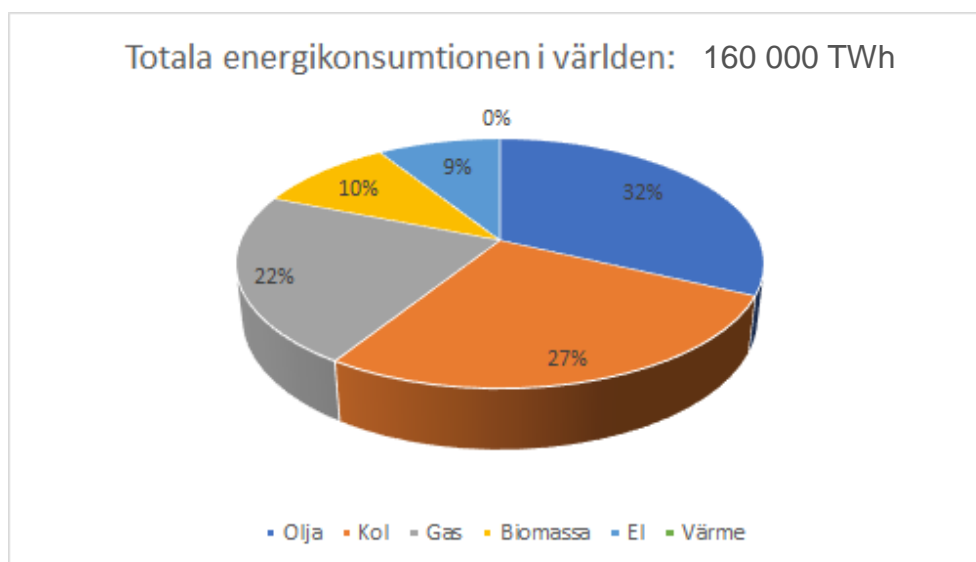
Råolja förekommer i flytande form och samlas därför i håligheter i porösa sedimentära bergarter, till exempel sandsten. Framför allt transportsektorn är fortfarande ytterst beroende av denna bränsletyp. Vid förbränning av olja bildas koldioxid som bidrar till växthuseffekten samt svaveldioxid och kväveoxid som leder till luftföroreningar och försurning av mark och vatten (Vattenfall 2013).

Naturgas används främst inom industrin i Sverige i många andra länder används den även för uppvärmning av bostäder och för matlagning. Naturgas består till största delen av metan, vilket innebär mindre utsläpp av luftförorenande ämnen som svavelföreningar jämfört med olja (Nationalencyklopedin 2018c). Utsläppen av koldioxid är lägst per energienhet jämfört med andra fossila bränslen. Däremot är metan i sig en mycket stark växthusgas, vilket gör att naturgas ändå kan ha en stor inverkan på klimatet vid läckage (Naturvårdsverket 2017).

I bergarten skiffer kan **skiffergas** ibland utvinnas. Sverige har inte tillräckligt stora fyndigheter för att utvinning ska vara ekonomiskt försvarbar men på andra håll i världen, speciellt i USA, har utvinningen ökat kraftigt under 2000-talet. Detta beror på den nya teknik som gjort det möjligt att borra längs horisontella skifferlager för att kunna utvinna gasen. Denna metod är mycket kritiserad då den innebär stora miljökonsekvenser lokalt, bland annat på grund av läckage av metan och kemikalier samt stor vattenförbrukning (Naturvårdsverket 2018).

2.2 Över 80 % av energikonsumtionen är från fossila bränslen

I dag består 81 % av all energikonsumtion av fossila bränslen vilken också är beräknat att öka kraftigt (Figur 2). Enligt Abasa *et al.* (2015) konsumeras idag över 160 000 TWh per år och det kommer finnas en efterfrågan på 280 000 – 290 000 TWh per år till 2035.



Figur 2. Fördelning av den totala energikonsumtionen i världen 2017, där olja, kol och gas räknas till fossila bränslen (Enerdata 2018).

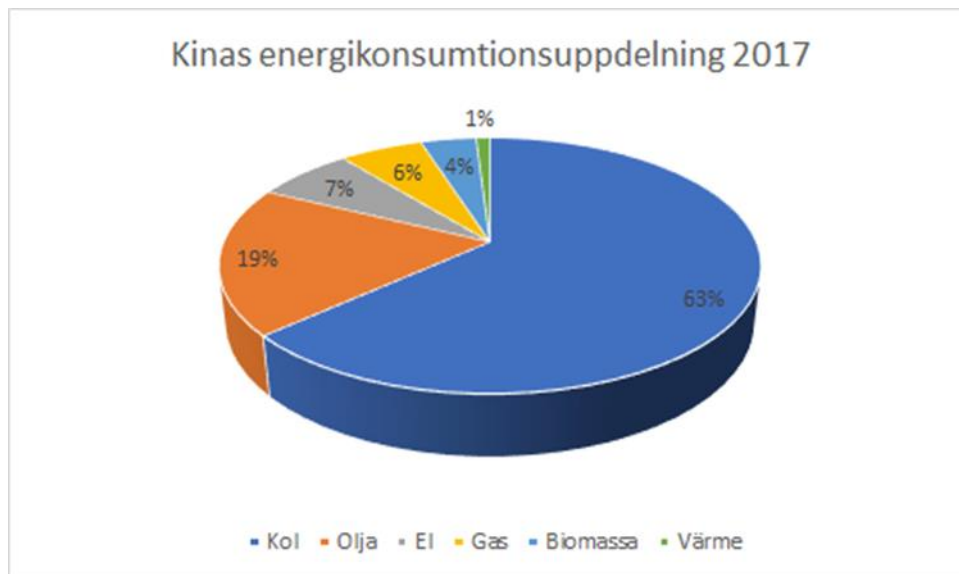
Mest fossila tillgångar har Ryssland, Nordamerika och Mellanöstern, medan de regioner som har minst är Sydamerika, Europa och Afrika (Enerdata 2018). I Tabell 2 ses de olika fossila tillgångarna uppdelat på region och fossil bränsletyp.

Tabell 2. Världens fossila bränslereserver 2017 i Gtoe och andel(%). 1 toe (ton oljeekvivalent) motsvarar 0,00001163 TWh.

Region	Kol	Olja	Gas	Summa
Nordamerika	170 (18 %)	8 (0,86 %)	7 (0,75 %)	185 (20 %)
Sydamerika	13 (1,4 %)	15 (1,6 %)	6 (0,64 %)	34 (3,6 %)
Europa	40 (4,3 %)	2 (0,21 %)	5 (0,54 %)	47 (5,0 %)
Afrika	34 (3,6 %)	16 (1,7 %)	13 (1,4 %)	63 (6,8 %)
Ryssland	152 (16 %)	18 (1,9 %)	52 (5,6 %)	222 (24 %)
Mellanöstern	0 (0 %)	101 (10 %)	66 (7,1 %)	167 (18 %)
Indien	62 (6,6 %)	1 (0,11 %)	1 (0,11 %)	64 (6,9 %)
Kina	76 (8,1 %)	2 (0,21 %)	2 (0,21 %)	80 (8,6 %)
Australien	60 (6,4 %)	2 (0,21 %)	10 (1,1 %)	72 (7,7 %)
Totalt	607 (65 %)	165 (18 %)	162 (17 %)	934 (100 %)

2.2.1 Kina - ett land med stort kolberoende

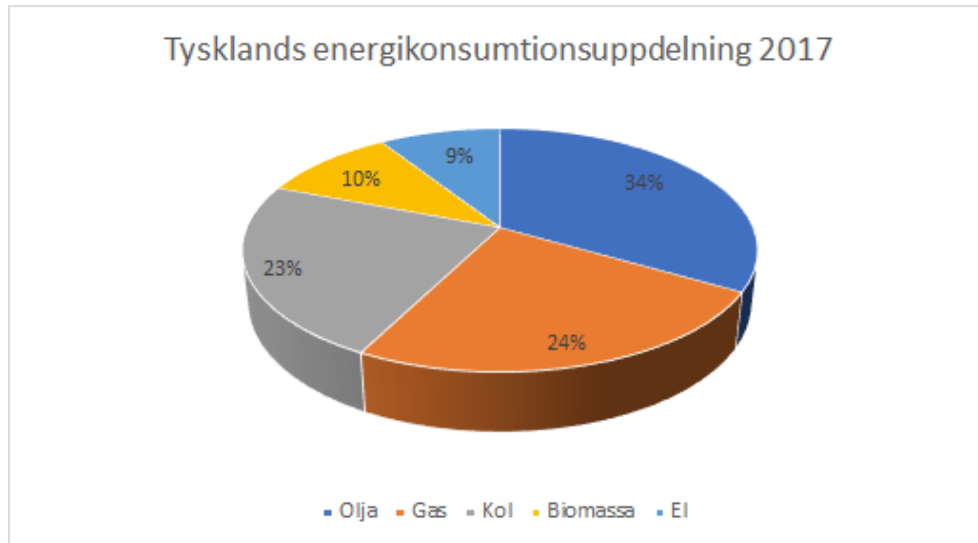
Kina är det land som släpper ut mest växthusgaser globalt sett, en fjärdedel av utsläppen kommer från Kina, vars totala energianvändning till 88 % är fossilt baserad. Kina gör därför stora satsningar på förnybara energislag. Trots detta baseras en stor del av energikonsumtionen på den billiga kolen som står för över 60 % av Kinas energi (Figur 3). Kolindustrin i Kina är inte planerad att minska i omfattning. Det man planerar är att minska dess andel i sin totala energiförsörjning. Eftersom Kinas industri är koldioxidintensiv leder stark ekonomisk tillväxt till ökade utsläpp. Under 2017 växte Kinas energikonsumtion med 2,9 procentenheter vilket var dubbelt så mycket som under 2016. Detta har lett till att kolproduktionen har ökat för första gången på tre år. Detta efter att ha haft lägre konsumtion i tre år, som huvudsakligen berott på energieffektiviseringar och nationell politik som inriktat sig på att minska koldioxidutsläppen (Enerdata - consumption 2018).



Figur 3. Fördelning av Kinas totala energikonsumtion 2017

2.2.2 Tyskland – fossil andel som globala medelvärdet

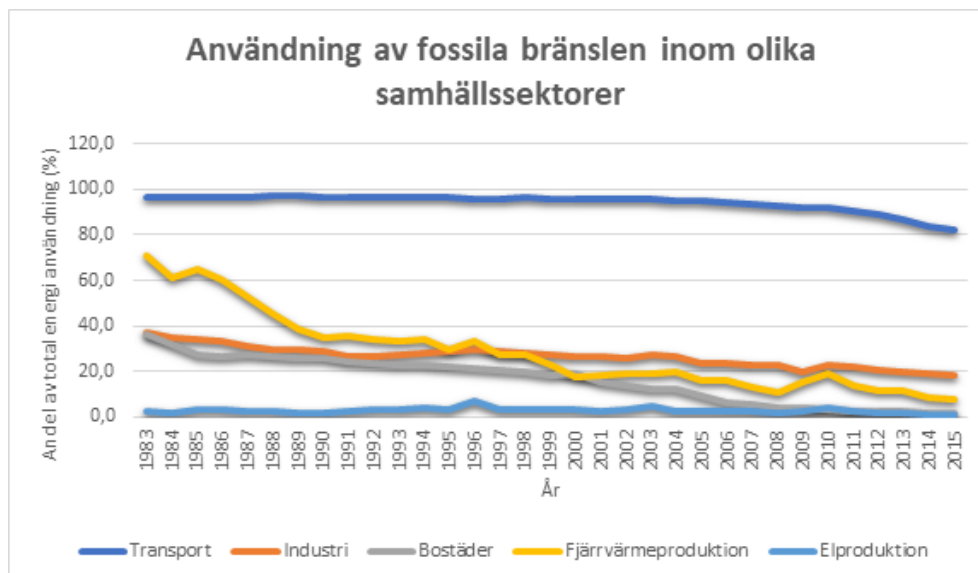
Tysklands utveckling mot att avveckla kärnkraften och investera i förnybara resurser har lett till att Tyskland år 2014 hade 27 % förnybart jämfört med 2000 då andelen låg på 6,3 %. Dock har Tyskland fortfarande en stor konsumtion av fossila bränslen. Framförallt då man ser på den totala energikonsumtionen där fossila bränslen står för 81 % av den totala energiförbrukningen (Figur 4), samma andel som det globala medelvärdet (Figur 2).



Figur 4. Fördelning av Tysklands totala energikonsumtion 2017

2.2.3 Sverige – ett land med låg användning av fossila bränslen

I Sveriges står fossila bränslen endast för 26 % av den totala energianvändningen (Enerdata 2018a). Fossila bränslen används inom transport, industri, bostäder samt el- och fjärrvärmeproduktion (Figur 5, Ekonomifakta 2018a). Av de olika fossila energislagen är olja störst (Tabell 3). I Sverige är den största utmaningen att få ner oljeberoendet inom transportsektorn.



Figur 5. Procentuell andel fossila bränslen (%) i olika samhällssektorer i Sverige inom tidsperioden 1983-2015 (Ekonomifakta 2018b).

Tabell 3. *Energianvändning för olika typer av fossila energibärare i Sverige 2016 (Ekonomifakta 2018a)*

Energislag	TWh	Andel
Olja	87,7	82 %
Naturgas	6,0	6 %
Kol och koks	13,0	12 %

2.2.4 Tio svenska företag som släpper ut mest koldioxid

Industrin är en stor utsläppskälla och det finns flera gemensamma nämnare för de processer de använder. Här redovisas vilka tio svenska företag som släppte ut mest koldioxid år 2017 och de metoder de vill utveckla för att minska sina koldioxidutsläpp (Tabell 4). Alla är direkt eller indirekt kopplade till energiproduktion och energianvändning.

Tabell 4. *De 10 företag i Sverige som släpper ut mest koldioxid (Sveriges Natur 2017a)*

Anläggning	Utsläpp av fossilt CO ₂ (Mton)	Verksamhet	Kommun
1 Luleå Kraftvärmeverk, Luleå	2,2	Förbränning	Luleå
2 Cements AB, Slitefabriken	1,6	Anläggning för framställning av cementklinkers eller kalk	Gotland
3 Preem AB	1,6	Olje- och gasraffinaderi	Lysekil
4 SSAB	1,5	Stål och metall	Oxelösund
5 SSAB	1,3	Stål och metall	Luleå
6 Borealis Krackeranläggning	0,6	Kemisk framställning av organiska baskemikalier	Stenungsund
7 St1 Refinery	0,5	Olje- och gasraffinaderi	Göteborg
8 LKAB	0,5	Malm och mineraler	Kiruna
9 Preem AB	0,5	Olje- och gasraffinaderi	Göteborg
10 Värtaverket	0,4	Förbränning	Stockholm

Tre av anläggningarna på listan har med **stål- och metallframställning** att göra, en viktig råvara bland annat för att kunna bygga olika typer av energianläggningar. När man framställer stål används kol som reduktionsmedel vilket ger koldioxidutsläpp. SSAB, LKAB och Vattenfall driver tillsammans ett projekt mot en fossilfri stålproduktion där målet är att järnproduktionen i framtiden ska vara vätgasbase-rad. Med direktreduktion kan vätgas skilja järnet från syret, utan användning av kol. Detta hade resulterat i att slutprodukten endast blir järn och vatten (Jernkontoret 2018). Just nu utvecklas metoden i en pilotanläggning som invigdes 2018. Målet är att ha en lösning på plats för fossilfritt stål 2035. I övrigt utvecklar SSAB ett nytt koncept för att minska koldioxidutsläppen som heter SSAB EcoUpgraded (SSAB 2018). Detta koncept bygger på att minska koldioxidutsläppen genom att hjälpa kunder att uppgradera till mer höghållfasta stål som resulterar i att en mindre

mängd stål krävs för att behålla samma hållfasthet samt ökar livslängden på slutprodukten. LKAB:s koldioxidutsläpp kommer huvudsakligen från brytningen av järnmalm. De har satt som mål att bli ett av de mest hållbara gruvföretagen i världen, och har därför satt upp ett flertal delmål. Ett av delmålen är att minska koldioxidutsläppen med 12 % per ton färdig produkt fram till år 2021 jämfört med år 2015. De har även mål att minska energiintensiteten med 17 %, kväveutsläppen med 20 % och stoffutsläppen med 40 % per ton färdig produkt under samma tidsintervall (LKAB 2018).

Lulekraft är ett **kraftverk** som producerar fjärrvärme till Luleå stad. Det drivs av processgas från SSAB:s produktion (SSAB 2018). Processgasen som förbränns innehåller i huvudsak kolmonoxid (CO) och vid förbränning av denna bildas CO₂. Lulekraft menar att deras process återanvänder energi som annars skulle behövas kompenseras av andra bränslen. Detta innebär att vid användning av andra bränslen skulle totala koldioxidutsläppen öka (Lulekraft 2012). Om SSAB med nya processer skulle minska sin kolmonoxidproduktion skulle Lulekraft behöva hitta andra bränslen till fjärrvärmeverket. Det andra fjärrvärmeverket på listan, Värtaverket, drivs till viss del av kol och den del av verket som gör det planerar man att avveckla till år 2022. Den andra delen, som invigdes år 2016, drivs till stor del av förnybara biobränslen och rester från skogsindustrin. Det är ett effektivt kraftvärmeverk med slutna system både för bränsle och aska, den är även utrustad med rökgaskondensering och rening av rökgaserna (Stockholmsexergi 2018). Värtaverket installerar under 2019 en testanläggning för att binda koldioxid som bildats från förbränning av biobränslen genom att ur rökgaserna komprimera koldioxid till flytande form och lagra den i underjordiska bergsformationer (Stockholmsexergi 2019, BECCS-teknik, Bio Energy Carbon Capture and Storage). Planen är att kunna fånga in 800 000 ton koldioxid per år från Värtaverket.

Vid **tillverkning av cement** uppstår koldioxidutsläpp där cirka 60 % kommer från den kemiska reaktionen som uppstår vid upphettning av kalksten. Resterande del av utsläppen kommer huvudsakligen från det bränsle som krävs för att värma cementugnen. Cementa AB har en nollvision för koldioxidutsläpp till år 2030. De arbetar med att energieffektivisera sin process samt att fasa ut användningen av fossila bränslen. De jobbar även med att utveckla cement med bättre klimategenskaper, ökat upptag av koldioxid hos betongstrukturer samt lagring alternativt återanvändning. För att minska cementens klimatpåverkan kan man ersätta delar av klinkern med liknande reaktiva material. Genom att minska klinkern i produktionen har Cementa minskat sina koldioxidutsläpp från bascement med cirka 8 %. Koldioxidupptaget är en kemisk process som sker väldigt långsamt i betongens yt-skikt. Den kan infånga mellan 15-20 % av processutsläppen från tillverkningen. Cementa vill förbättra dagens krossning och hantering vid rivning så att betongen får större exponeringsyta och därmed ökar koldioxidupptaget (Cementa 2017). Eftersom cement används i de flesta byggnader finns det en tydlig koppling till energisystemen.

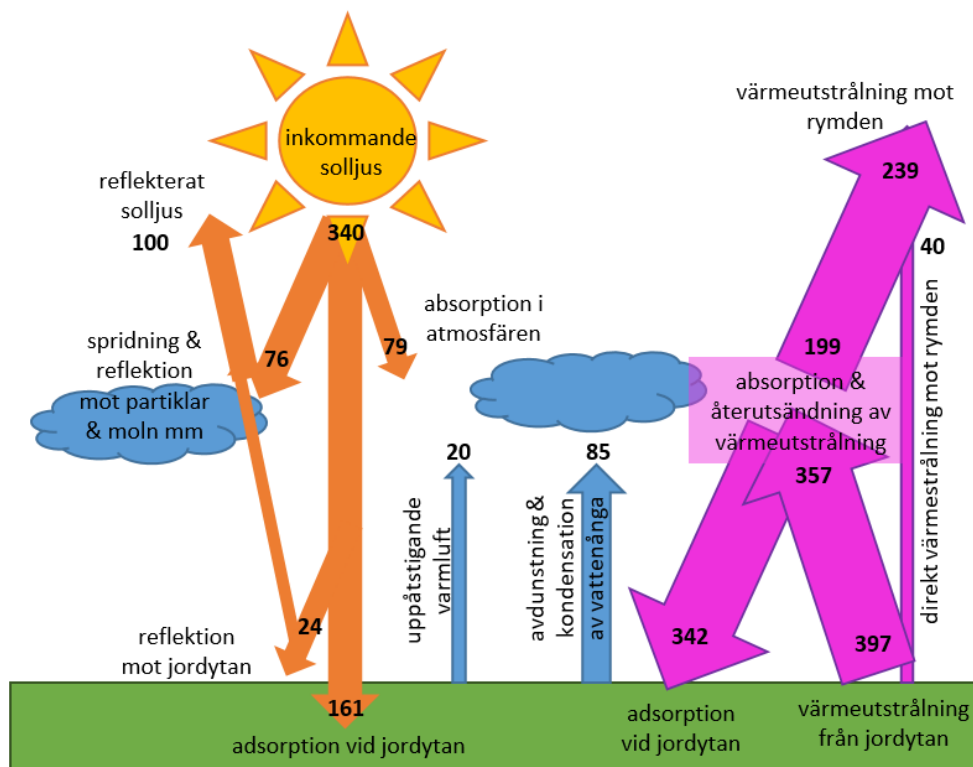
Olje- och gasraffinaderier har förstås en utmaning i att grundmaterialet är fossilt och främst avsett att brännas. Dessa företag har främst fokuserat sitt miljöarbete på att få ner andra ämnen än växthusgaser, som bly och svavel. Preem AB var de första i världen att utveckla blyfri bensin samt diesel med låg svavelhalt. De har nu börjat blanda in förnybart i sina bränslen. Preem började producera sitt egna förnybara drivmedel 2010 (Preem 2017). St1 strävar efter att bli den ledande producenten och försäljaren av CO₂-medveten energi. De menar att de har goda förutsättningar att investera i framtiden då deras tidigare traditionella oljeverksamhet har haft goda resultat. Deras mål är att utveckla och kommersialisera funktionella och miljömässigt hållbara energilösningar (St1 2018). Både Preem och St1 använder PFAD i sin HVO-diesel. PFAD är en restprodukt från palmoljaproduktion. Palmoljaproduktion i sig är dock inte särskilt miljövänlig och troligtvis ökar palmoljaproduktionen om detta bränsle skulle öka i användning (Sveriges Natur 2017b).

Även Borealis använder fossil råvara vid sin tillverkning av **organiska baskemikalier**. De är t.ex. den enda tillverkaren av polyeter i Sverige. I deras krackningsprocess kan de använda fyra olika råvaror; nafta, etan, propan och butan. De fokuserar på att minska kolväteutsläpp (VOC, flyktiga organiska kolväten), energieffektivisering, avfall samt buller. De söker om tillstånd från länsstyrelsen för att släppa ut koldioxid, uppvärmt kylvatten, VOC, olja, NO_x, SO₂, sotpartiklar och buller. Genom att de utför systematiska läcksökningar och tekniska åtgärder har de lyckats minska kolväteutsläppen till luft betydligt (Borealis 2017). Frågan är om det går att ersätta den fossila råvaran med förnybart i stor skala?

2.3 Växthuseffekten

2.3.1 Naturlig växthuseffekt

Jordens klimatsystem består av ett stort antal olika processer, exempelvis vind, havsströmmar, nederbörd etcetera, som i grunden alla drivs av solen. Solen avger strålning i huvudsak mellan våglängderna 100 - 1000 nm, vilket utgör spannet UV-C till infraröd strålning. De av kortare våglängder, det vill säga UV-C och UV-B strålning, absorberas i stratosfären av O₂, N₂ samt av ozonmolekyler. Det ljus som faktiskt når jordytan är därför ungefär hälften av UV-A ljuset samt det synliga ljuset (380 - 740 nm) som absorberas av mark, vatten, skog och byggnader. Den absorberade energin lämnar sedan jorden i form av infraröd strålning (värmeenergi) vilken slutligen lämnar jordens atmosfär. Partiklar i atmosfären kan, genom antingen reflektion eller absorption följt av emission, påverka den mängd solstrålning som når jordytan. Dessa energiflöden illustreras i Figur 6. Utan växthuseffekten hade medeltemperaturen på jorden varit cirka -19° C (Bernes 2016).



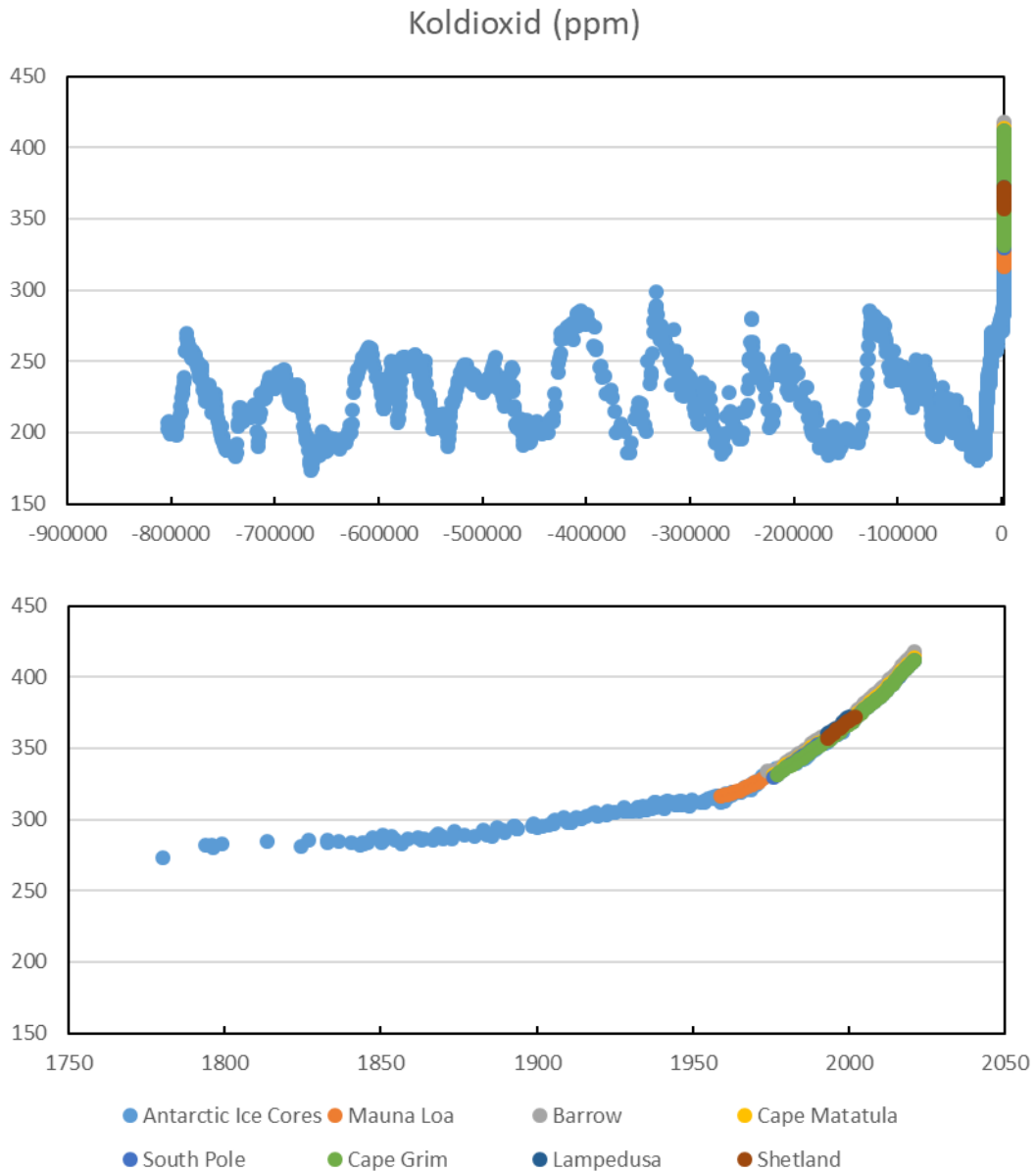
Figur 6. Energiflöden i atmosfären. Enheten är W/m^2 (efter Bernes 2016)

Atmosfärens sammansättning utgörs i huvudsak av N_2 (78 %), O_2 (21 %) och CO_2 (0,038 %). Dessa gaser absorberar mindre än en fjärdedel av den inkommande energin från solen och de två förstnämnda, O_2 och N_2 , hindrar heller inte värmeutstrålningen ut från jorden. Andra gasformiga ämnen som effektivt kan absorbera värmeutstrålningen som kommer från jorden finns i lägre koncentrationer i atmosfären. Dessa är främst vattenånga och CO_2 , men bland annat CH_4 (metan) och N_2O (lustgas) har också den egenskapen. Den lägre atmosfären absorberar strålningen och emitterar ut den i alla riktningar, vilket håller kvar värme vid jordytan. Vattenånga utgör 0,4 % medan de övriga växthusgaserna sammantaget upptar knappt 0,04 % av atmosfärens totala volym. Olika växthusgasers förmåga att absorbera energi skiljer sig. Hur stor inverkan de har anges i *Global Warming Potential* (GWP). En gas med hög GWP har stor förmåga att påverka klimatet i förhållande till CO_2 , som har GWP 1 (Bernes, 2016). Olika gasers GWP finns i Tabell 5.

2.3.2 Antropogen växthuseffekt

Sedan andra halvan av 1800-talet har vädret i större omfattning observerats regelbundet i allt fler delar av världen. Dessa observationer visar på att klimatets utveckling följt en helt ny trend sedan början av 1900-talet. Från långsam avkylning rör vi oss nu mot snabb uppvärmning. Under samma period har även växthuseffekten från atmosfären ökat på grund av stadigt ökade halter av växthusgaserna. Fram till 1800-talet var koncentrationen av CO_2 , N_2O och CH_4 mer eller mindre konstanta i atmosfären. CO_2 -halten låg då på runt 280 ppm och fram till 1960-talet hade den inte stigit högre än till 320 ppm (Figur 7). Sedan dess har den dock ökat med runt 2

ppm per år och idag ligger CO₂-halten på över 400 ppm, vilket är högre än den varit på minst 800 000 år (Figur 7).



Figur 7. Förändring i koncentration av växthusgasen CO₂ över tid (x-axlarna visar årtal, minus för de som är innan år noll). Översta figuren visar förändring över cirka 800 000 år och nedre figuren ett utsnitt av de övre figuren från år 1780 till 2022. Källa: US-EPA 2022.

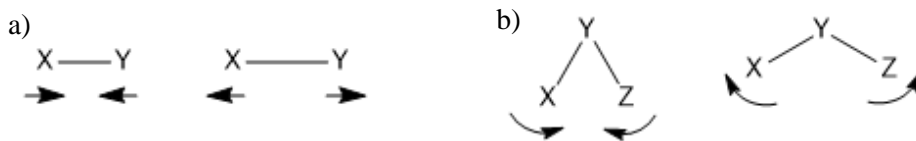
Denna ökning beror i huvudsak på utsläpp i samband med förbränning av fossila bränslen. Utöver detta bidrar människor även till ökade halter av CH₄ och N₂O genom utsläpp och markanvändning. Halten av CH₄ i atmosfären har nästan fördubblats sedan slutet av 1800-talet till dagens genomsnittshalt på 1,8 ppm medan halten av N₂O ökat med runt 15 % till runt 0,32 ppm. Trots att båda dessa halter är förhållandevis låga absorberar båda gaserna värmestrålning i våglängder där resten av atmosfären är relativt transparent, vilket innebär att även små ökningar i halten CH₄

och N₂O märkbart bidrar till absorptionen av dessa våglängder. Detta i sin tur bidrar till en tydlig förstärkning av växthuseffekten (Bernes 2016).

2.3.3 Egenskaper hos växthusgaser

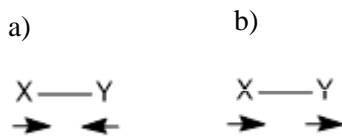
Absorption av energi har som störst sannolikhet att ske då en molekyls interna rörelser har nästan samma frekvens som det infallande ljuset. Dessa rörelser sker på två olika sätt där ett är genom sträckning av bindningen mellan två atomer. Två atomer i en molekyl som har någon typ av bindning mellan sig anses befinna sig på ett visst avstånd mot varandra. Men detta avstånd är endast ett genomsnitt då atomerna egentligen alltid förflyttar sig mot och ifrån varandra i en viss frekvens, vilket illustreras i Figur 8a. Frekvensen är relaterad till vilken typ av bindning samt vilka atomer som ingår i den. För bindingarna C-H och O-H är frekvenserna inte inom det infraröda spektrumet vilket leder till att värmestrålning inte absorberas. Bindningen C-F har däremot frekvenser som ligger inom spektrumet och alla molekyler med denna bindning bidrar därmed till växthuseffekten (Baird *et al.* 2012).

Den andra typen av vibrationer illustreras i Figur 8b och uppstår mellan två atomer i en molekyl som är bundna till en tredje atom men inte till varandra, då de förflyttar sig mot och ifrån varandra. Vinkeln mellan dessa atomer ökar och minskar då med en viss frekvens. Hos de flesta organiska molekyler sker denna typ av vibrationer inom det infraröda spektrumet (Baird *et al.* 2012).



Figur 8. Vibration genom a) sträckning av bindning samt; b) genom böjning av vinkeln mellan ämnen i en molekyl

Ett krav för att IR-ljus ska absorberas är att molekylen måste vara dipolär vid något tillfälle i vibrationen. Den behöver alltså inte ha en permanent dipol. Homonukleära molekyler som syrgas och kvävgas har aldrig någon temporär dipol och därför absorberar de inte IR ljus. CO₂ är en molekyl vars genomsnittliga form inte är dipolär, men som blir det temporärt vid något tillfälle i sitt rörelsemönster. Det finns två olika sätt en CO₂-molekyl kan röra sig vid sträckningsvibration, Figur 9a visar en symmetrisk vibration och Figur 9b visar en asymmetrisk vibration (Baird *et al.* 2012).

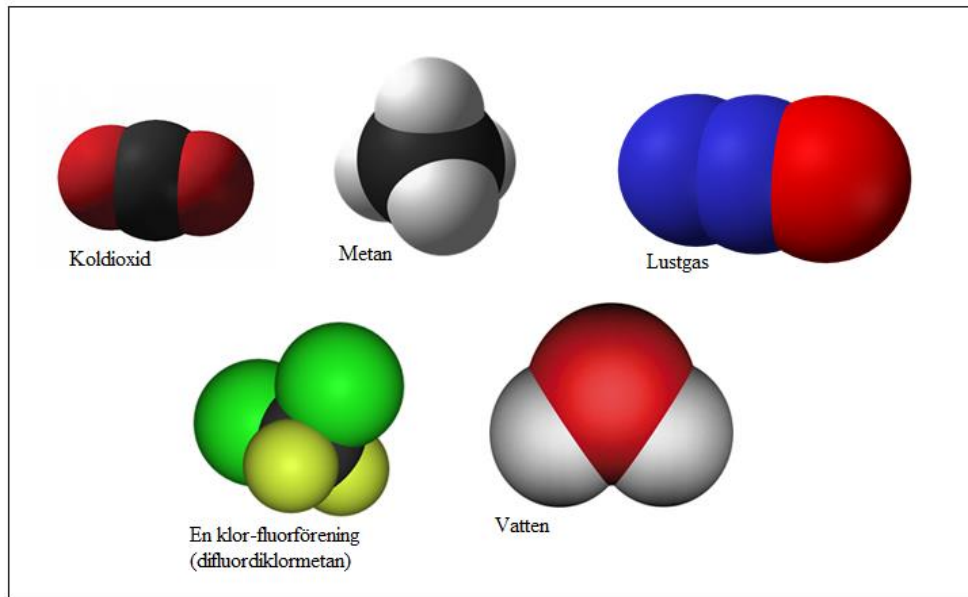


Figur 9. a) Symmetrisk vibration samt; b) asymmetrisk vibration hos molekyler

Vid den symmetriska vibrationen bildas ingen dipol då de negativa och positiva laddningscentrumen alltid sammanfaller. Vid asymmetrisk vibration är detta inte fallet och IR-ljus kan absorberas. CO_2 -molekyler blir även dipolära under böjningsvibrationer, då molekylen avviker från sin kolinearitetslinje (Baird *et al.* 2012). Generellt har molekyler med tre eller fler atomer någon typ av vibration som absorberar värmestrålning, även om deras genomsnittliga form är symmetrisk (Baird *et al.* 2012).

2.4 Vanligaste växthusgaserna

Fem av de vanligaste växthusgaserna är vattenånga, koldioxid, metan, lustgas, samt halogenerade föreningar (Figur 10). Vattenånga är den största bidragande faktorn till den naturliga växthuseffekten, i genomsnitt står den för cirka 60 % av uppvärmningen. Vattenånga kontrollerar inte jordens temperatur utan vattenånga kontrolleras av temperaturen (ACS 2016). Vatten är konstant i rörelse i atmosfären, den förångas från jordens yta och blir till vattenånga som följer med i uppåtgående luftströmmar. När vattenångan uppnått en viss höjd kondenseras den och blir till moln. Efter ett tag börjar det regna eller snöa och det återkommer då till jorden (NASA 2018). Koldioxid (CO_2) släpps ut till atmosfären genom förbränning av fossila bränslen som kol, olja och naturgas samt genom förbränning av avfall, träd och träprodukter och vissa kemiska reaktioner (som tillverkning av cement, se stycke 2.2.4). I kolets kretslopp (se stycke 2.5) är växternas upptag av koldioxid den största och viktigaste naturliga kolinlagringsprocessen. Metan (CH_4) släpps ut i atmosfären genom produktion och transport av kol, naturgas och olja. Lustgas (N_2O) släpps ut i atmosfären genom jordbruks- och industriella verksamheter samt vid förbränning av fossila bränslen och avfall (EPA 2016). Viktiga mänskliga källor till lustgas kommer från jordbruk genom bl.a. kvävegödsling och markodling, boskapsgödsel, förbränning av samt industriella processer. Mer än en tredjedel av utsläppen kommer från mänskliga aktiviteter (ICOS uå). Halogenerade föreningar (till exempel CFC) är den fjärde typen av växthusgaser. De är syntetiska och kommer från flera olika industriella produktioner (EPA 2016).



Figur 10. Molekylbilder på de växthusgaser som nämns i texten (Wikipedia 2018).

2.4.1 Uppehållstider för växthusgaser

Uppehållstiderna för växthusgaserna är olika. För koldioxid är det svårt att uppskatta uppehållstid eftersom det inte sker en enkel minskning över en förutsägbar tidsskala. Koldioxiden sprids först ut genom kolcykeln medan det blandas in i havet och biosfären under några hundra år. Därefter avlägsnas gasen under flera hundra tusen år tills den stegvis inkorporeras i karbonatstenar. Resterande andel försvinner genom andra långsamma processer som kan ta flera tusen år (se även avsnitt 2.5). För metan är uppehållstiden kortare, cirka 12 år. Metan är kortlivat men är en av de kraftfullaste växthusgaserna. Lustgas har kortare uppehållstid än koldioxid men längre än metan, ungefär 114 år. Halogenerade föreningar innehåller flera olika ämnen som kan vara i atmosfären från mindre än ett år till flera tusen år (Hull 2009).

Tabell 5. Sammanställning av växthusgasernas egenskaper (se källor i texten avsnitt 2.4.2). GWP från Myhre et al. (2014).

Växthusgas	Naturligt genom	Antropogent	Uppehållstid	GWP
Koldioxid (CO₂)	Cellandning	Förbränning av fossila bränslen, avfall, träd och träprodukter	Koldioxiden sprids först ut av kolcykeln medan det blandas in i haven och biosfären under några hundra år. Därefter avlägsnas gasen under flera hundra tusen år tills den stegvis inkorporeras i karbonatstenar	1
Metan (CH₄)	Våtmarker Animalisk nedbrytning	Produktion och transport av fossila bränslen Boskap och andra jordbrukspraxis Nedbrytning av organiskt avfall i deponier	ca 12 år	28
Lustgas (N₂O)	Genom svampars och vissa sorter av bakteriers respirationsprocesser	Jordbruks- och industriella verksamheter Förbränning av fossila bränslen och avfall	ca 114 år	265
Vattenånga (H₂O (gas))	Genom vattencykeln		Vattnet cirkulerar i vattencykeln	
Halogenerade föreningar (t.ex. CFC)		Industriella produktioner	ca 1-1000 år	ca 1-20 000

2.4.2 Hur växthusgaser bildas naturligt

Några av gaserna uppstår även naturligt (Tabell 5). **Koldioxid** bildas t.ex. genom cellandning som är cellens sätt att ta tillvara på energi och syre där en av restprodukterna är koldioxid (Khan Academy 2015). Även **metan** bildas genom naturliga processer. Idisslare som vilda och tama kor, bufflar, får och getter producerar mängder av metan genom sin matspjälkning. Dessutom bildas metan vid förvaring av gödsel i olika behållare. Eftersom människor föder upp dessa djur för matproduktion och andra produkter anses dessa utsläpp vara människorelaterade även om de inte orsakas av mänskliga industriella processer. Metan bildas även i våtmarker där bakterier bryter ner organiskt material i syrefria miljöer vilket är den största källan till naturligt producerad metan. Mindre källor till naturligt producerad metan inkluderar termiter, hav, sediment, och vulkaner (EPA 2016). En annan naturlig källa är metanläckage i samband med att den arktiska isen smälter. Metan sipprar

upp genom isen där den tidigare legat begravd, vilket i sin tur ytterligare kan påskynda uppvärmningen. Metan bildas även i haven bl.a. från den havsbaserade mikroben *Nitrosopumilus maritimus* som producerar metan genom en komplex biokemisk process (Platt 2012). **Lustgas** produceras av svampar och vissa sorter av bakterier, både i jord och i hav, genom deras respirationsprocesser (Thomson *et al.* 2012). **Vattenånga** bildas genom vattencykeln. De halogenerade föreningar som finns i atmosfären är nästan alla syntetiskt tillverkade och de existerade inte innan den industriella eran. Det finns bara några halogenerade föreningar som uppstår naturligt och dessa är till exempel metylbromid, metylklorid och tetrafluormetan (ACS 2018).

2.5 Kolets kretslopp

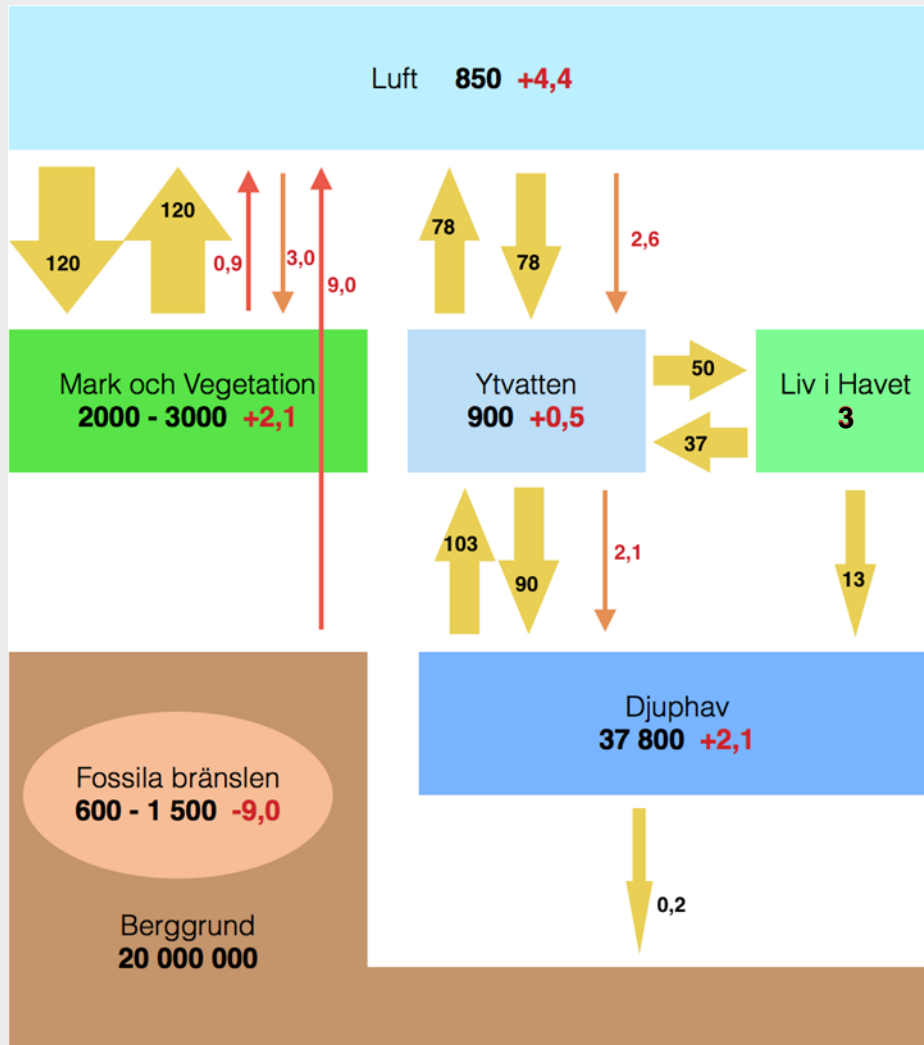
Kol förekommer på jorden i många olika former. I störst mängd existerar det som karbonater i sedimentära bergarter men ansevärliga mängder återfinns även i långtidslagringar av fossilt kol och olja. Av jordens torra biomassa utgörs ungefär hälften av kol. Detta innefattar de vanligaste beståndsdelarna som exempelvis cellulosa, stärkelse, proteiner, lignin och lipider (IPCC 2001).

Cirka 10 % av CO₂ i atmosfären omsätts genom fotosyntes varje år. Större delen av den producerade biomassan kommer sedan att brytas ned, men den exakta andelen kan variera kraftigt från ekosystem till ekosystem (Petersson 2006). En uppskattad fördelning av kol mellan olika kollager, samt flödena mellan lager presenteras i faktarutan på sid 26. Kolets uppehållstid i atmosfären är svårdefinierad på grund av att hastigheterna mellan de olika upptagningsprocesserna skiljer sig. Enligt The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) kan uppehållstiden för CO₂ ligga mellan 5 - 200 år och en exakt uppehållstid har inte gått att fastställa (IPCC 2001).

Den antropogena delen av kolets kretslopp uppstår då människan förbränner fossila bränslen som kol, olja och naturgas varvid geologiskt lagrad kol tillförs atmosfären och kretsloppet. Det kol som frigörs har varit utanför kolets kretslopp under väldigt lång tid. Även avverkning av skog och moderna jordbruksmetoder orsakar en nettoöverföring av CO₂ till atmosfären från biomassa genom förbränning, nedbrytning eller reducerad humusmängd i jorden. Ungefär hälften av nettotillförseln av CO₂ upptas av haven genom utbyte mellan hydrosfären och atmosfären, resterande andel leder till en direkt ökning av CO₂-halten i atmosfären (Petersson 2006).

Kolets kretslopp illustrerat

Lagring och naturliga flöden visas i svart. Flöden och förändring i mängd lagrat kol orsakat av mänsklig aktivitet visas i rött (enhet 10^9 ton kol)



Källa: Bernes 2016

2.6 Hur vet man hur klimatet sett ut tidigare?

2.6.1 Direkta metoder

Som nämnt i stycke 2.3.2 har mer utförliga observationer av temperatur, lufttryck och nederbörd gjorts sedan andra halvan av 1800-talet. På vissa platser har dock väderobservationer gjorts redan under 1600-talet. I Sverige har SMHI mätstationer över hela landet som kontinuerligt utför mätningar.

2.6.2 Indirekta metoder

För att veta hur klimatet såg ut om direkta mätningar inte gjorts kan slutsatser dras från indirekt data, så kallad proxydata. Dokumenterade observationer om skördar och skördetider kan ge information om växtperioder och nederbörd det året. Information om isläggning och islossning kan ge motsvarande information för vattenecosystemen. Här beskrivs sju metoder som funkar bra i lite olika tidsskalor.

2.6.2.1 Isotopanalys

Kol förekommer naturligt i tre isotoper. Isotopen C-12 utgör 98,9 % av allt kol och C-13 utgör 1,1 %. Båda dessa isotoper är stabila. Små mängder av den radioaktiva isotopen C-14 förekommer också. Cirka 10 kg C-14 bildas i atmosfären på grund av solstrålning varje år. Isotopen har en halveringstid på 5 730 år. Fossila bränslen har varit utanför kolets kretslopp i miljontals år och mängden C-14 är därför obefintlig (Houghton 1997).

När växter tar upp CO₂ från atmosfären innehåller kolet proportionerligt mindre C-13 än C-12. Därmed innehåller all biomassa och även fossila bränslen mindre andel C-13 än atmosfären. Vid nettotillförsel av CO₂ från förbränning av fossila bränslen, skogsbränder och nedbrytning av organiskt material förändras kolets proportioner i atmosfären. Att studera förhållandet mellan isotoper i atmosfären, hav och i isolerad luft i till exempel iskärnor kan ge en bild av havets upptag av kol och av hur mycket kol som tillförts från fossila bränslen, från förbränning eller nedbrytning av organiskt material (Houghton 1997).

Även syreisotoper kan användas för att erhålla historiska klimatdata. Vatten som innehåller den tyngre syreisotopen O-18 avdunstar inte lika lätt. Proportionerna mellan isotoperna kan visa på temperatur vid avdunstning (Houghton 1997).

2.6.2.2 Trädringar

En typ av proxydata är årsringarna i trädstammar. En tjockare ring visar på bättre förutsättningar för trädet att växa under det året. Genom att jämföra de äldre ringarna med de nyare ringarna där väderdata finns tillgänglig kan de historiska väderförhållandena under trädets livstid uppskattas. För att få insikt längre tillbaka kan döda träd användas. Året trädet dog måste då fastslås genom att jämföra ringarna med ett levande träd av samma art i samma område och hitta den överlappande perioden då båda träden levde. Olika trädslag gynnas av olika väderförhållanden, vissa arter är mer beroende av nederbörd, andra av värme. Sammanlagt kan en helhetsbild av det lokala historiska klimatet och dess förändringar erhållas. Träd som undersöks bör vara i ett område som inte upplevt större mänsklig inverkan och på en plats där variationer i väder är tydliga, alltså inte nära ett vattendrag (NCEI 2016a).

2.6.2.3 Koraller

Koraller har skelett som består av kalciumkarbonat. Under ett sådant skeletts bildning avgörs dess densitet av yttre faktorer; temperatur, näringstillgång och tillgång

till ljus. Då dessa faktorer varierar mellan sommar och vinter betyder detta att korallskelett, likt träd, har årsringar. Kemisk analys av syreatomer i dessa lager kan ge information om väderförhållanden under året de bildades. Andelen tunga syreisotoper i korallskelettet påverkas av vattentemperatur och salinitet (salthalt). Blekning och sjukdomsutbrott under korallens livstid syns också i korallskelettet och kan visa på klimathändelser (NCEI 2016b).

2.6.2.4 *Iskärnor*

En annan typ av proxydata kan erhållas från islagringar i glaciärer eller i polarisarna. Genom att borra upp cylindriska prover, från upp till flera tusen meters djup, kan ämnena och den kemiska sammansättningen analyseras. Exempelvis kan gasinnehållet (exempelvis CO₂ och CH₄) i luftbubblor lagrade i isen studeras genom att frigöra dem i vakuum för att få en bild av atmosfärens sammansättning vid dess bildning, medan relationerna mellan syreisotoperna i isen kan indikera förhållandena i temperatur. Förekomst av eventuella partiklar kan även ge oss en bild av vulkanisk aktivitet. Skillnaden i temperatur under sommar- och vinterhalvåret leder till skillnader i isens struktur vilket skapar distinkta lager vars tjocklek kan indikera mängd av nederbörd. Information från iskärnor går i dagsläget cirka 800 000 år tillbaka (NCEI 2016c).

2.6.2.5 *Pollen*

I sediment lagrat i botten av sjöar, hav eller andra vattensamlingar kan man hitta fossilerat pollen. Dessa kan vara så små som 10 – 200 µm men på grund av dess unika utseenden kan de ändå ge en tydlig bild av den förekommande vegetationen vid sedimentets tillkomst. Denna kan i sin tur indikera temperaturer och klimatförhållanden vid samma tid (NCEI 2016d).

2.6.2.6 *Sjö- och havsbottnar*

I överlag hittas många indikationer på historiska klimatförhållanden i sediment. Dels i dess kemiska sammansättning men även genom förekomst av eventuella fossiler. Ett exempel på detta är fossila foraminiferer som är en typ av amöbadjur som påträffas i havssediment. Dessa har ett skal som utgörs i huvudsak av de tre vanligt förekommande grundämnena kol, syre och kalcium. Halten av dessa grundämners isotoper i skalen kan ge en bild av förhållandena i temperatur, inlandsisarnas utbredning samt havsströmmarnas cirkulation under deras livstid (Romare 2013).

2.6.2.7 *Varvig lera*

Sedimentära avlagringar i sjöar kan bilda lager, där sommar- och vintersediment har olika färg och grovhet. Dessa lager användes först i Sverige för att kartlägga glaciärernas tillbakadragande under istiden. Likt trädringar och iskärnor ger lagren en kronologisk tidslinje vilket gör datering av sedimentet enkel. Sedimentets sammansättning, tjocklek, utseende samt i vilka proportioner kol- och syreisotoper förekommer kan ge information om klimatförhållanden vid tiden för avlagringen (Zolitschka, 2007, Houghton 1997).

2.6.3 Modeller

För att simulera flöden och rörelser i klimatsystemet används klimatmodeller som baseras på välkända fysiska processer. Klimatmodeller hänvisas även ofta till som General Circulation Models (GCMs) och använder sig av matematiska ekvationer för att simulera flödet av energi och materia genom interaktionen mellan hav, atmosfär och land. Konstruerandet av klimatmodeller är en komplex process som grundas i att identifiera och värdera jordens system-processer och representera dem med matematiska ekvationer. Trovärdigheten hos en modell prövas genom att utgå från historiska data och simulera dagens klimat utifrån dem och se hur väl resultatet överensstämmer med dagens klimat. Detta ger en bild av modellens precision och vid behov kan de beskrivande ekvationerna justeras tills de överensstämmer tillräckligt väl med givna data (NOAA climate.gov uå).

2.7 Klimatscenarier - framtiden

En klimatmodell som visat sig hålla för historisk data anses vara trovärdig för att simulera klimatförhållanden i framtiden. För att kunna köra simuleringarna för klimatförändringar i framtiden byts tidigare initiala data ut mot specifika framtida parametrar. Detta ger olika scenarier utifrån möjliga, antagna parametrar. Scenarier kan ge oss en bild mänsklighetens tillväxt, hur landområden kommer användas i framtiden och hur de atmosfäriska förhållandena skulle påverkas av varje möjligt utfall. IPCC grundades av FN:s miljöprogram 1988 och arbetar aktivt med att förse världen med tydlig bild av klimatförändringar ur ett vetenskapligt perspektiv. År 2000 publicerade de Special Report on Emissions Scenarios (SRES) som utgjordes av fyra olika typer av scenarier ämnade att beskriva en stor mängd möjliga framtida förhållanden. Var och ett av scenarierna baserades på ett komplext samband mellan de drivande socioekonomiska krafterna av växthusgas och andra utsläpp samt omfattningen av hur dessa förväntades öka fram till 2100. Dessa scenarier har varit i bruk i över ett årtionde och många klimatmodeller använder sig av dess beteckningar. Under 2013 enades dock klimatforskare om att nya scenarier behövde konstrueras med fokus på nivåer av växthusgaser i atmosfären vid år 2100. Dessa scenarier betecknas RCPs, vilket står för Representative Concentration Pathways, och beskriver gemensamt klimatpåverkan från ökad koncentration av växthusgaser. Scenarierna är namngivna efter den nivå av strålningsdrivning som uppnås till år 2100. Exempelvis innebär RCP4,5 att en strålningsdrivning på $4,5 \text{ W/m}^2$ genereras av den existerande halten växthusgaser i atmosfären vid år 2100 och för RCP8,5 är strålningsdrivning $8,5 \text{ W/m}^2$. Dessa scenarier nedskalas också ofta för att tillsammans med en regional klimatmodell skapa regionala klimatscenarier (NOAA Climate.gov uå). RCP-scenarierna skiljer sig från FN:s tidigare framtagna SRES-scenarier främst genom att dessa inte är kopplade till en specifik utveckling inom samhällsekonomi (Sjökvist *et al.* 2015).

En stor fördel med klimatscenarier är att de underlättar vid konstruktion av individuella experiment genom att bidra med ett ramverk för dem att standardiseras

inom. Att utgå ifrån en gemensam grund underlättar även kommunikation och jämförelse av olika resultat för olika forskningsgrupper runt om i världen. Experter på klimatmodellering studerar specifikt konsekvenserna av global uppvärmning på klimatet i sig medan andra fokuserar på att bedöma relationen mellan emissionerna och olika socioekonomiska scenarier eller zoomar in i regional skala (Wayne 2013).

2.7.1 Klimatet i framtidens Sverige

I Sverige har scenarierna RCP4,5 och RCP8,5 bearbetas för att ge regionala klimat-scenarier. Årsmedeltemperaturen enligt denna analys visar på en temperaturökning i framtiden för hela Sverige. För RCP8,5 väntas i jämförelse med referensperioden 1961 - 1990 en ökning på runt 4 grader i medeltemperatur i södra Sverige, medan skillnaden i norr väntas kunna vara uppemot 6 grader. I scenariot som räknar in begränsningar av utsläpp (RCP4,5) uppskattas dock skillnaden vara runt 2 grader lägre. Även årsnederbörden väntas öka i Sveriges framtida klimat. Skillnaden här är även den lite mildare i RCP4,5, 10 - 30 % ökning jämfört med 15 - 40 % i RCP8,5. Tillrinningen väntas öka i nästan hela Sverige. Denna nedskaling av RCP-scenarier till regional nivå har gett oss en omfattande databas med olika meteorologiska och hydrologiska klimatindex, till exempel medeltemperatur och vegetationsperioder, vilka förväntas underlätta arbetet på läns- och kommunnivå gällande vårt framtida klimat väsentligt (Sjökvist *et al.* 2015).

2.8 Effekter av uppvärmning på land

Jordens klimat är mycket komplext med en mängd olika faktorer som påverkar dess utveckling, däribland människans leverne sedan den industriella revolutionens början. Ökningen av den globala medeltemperaturen sedan början av 1900-talet avviker från klimatets tidigare utveckling (Bernes 2016). Nedan ges några exempel på effekter denna uppvärmning kan komma att få på land och till havs.

2.8.1 Förändringar i nederbörd

En dokumenterad effekt av den globala uppvärmningen under föregående sekel är förändringar i nederbördsmängd. I vissa områden har man sett en ökad nederbördsmängd, som i östra Nordamerika och de norra delarna av Eurasien, medan man i andra subtropiska områden som Västafrika och Medelhavsområdet sett en minskad nederbördsmängd. Luftens förmåga att ta upp vattenånga ökar ju mer temperaturen stiger, vilket tros vara anledningen till att andelen av den totala nederbörden som faller i form av extremt intensiva regn eller snöfall har ökat. Denna effekt är märkbar oavsett om den sammanlagda nederbördsmängden i området har ökat eller minskat. Den genomsnittliga nederbördsmängden väntas öka med runt 2 % per grads uppvärmning. De områdena där genomsnittsnederbörden ökat kommer fortsätta att få mer nederbörd, medan de områden som har fått minskad nederbörd kommer att få se en fortsatt minskning (Bernes 2016).

2.8.2 Minskad utbredning av permafrost och glaciärer

Områden med ständig tjäle utgör i dagsläget runt en femtedel av norra halvklotets landyta, redan i mitten av detta sekel kan detta område ha minskat med 30-40 % jämfört med början av seklet. När marken i dessa områden tinar kommer nedbrytningen av det organiska materialet att öka, vilket leder till ökade utsläpp av koldioxid och metan. Även de glaciärer som befinner sig i världens olika bergskedjor förväntas fortsätta minska, vid seklets slut kan de ha minskat sin volym med 15 till 85 % beroende på vilken klimatmodell man väljer att ta hänsyn till (Bernes 2016).

2.8.3 Två sätt för arter att anpassa sig till klimatförändringar

En art som inte klarar av de nya förhållandena som de framtida förändringarna i det lokala klimatet för med sig har två alternativ om de ska överleva. Arten kan anpassa sig till det nya klimatet genom att genetisk variation inom arten gör att de individer vars genetiska egenskaper är bättre lämpade för det nya klimatet överlever och förökar sig och på sätt gör att arten klarar sig bättre. Kommande sekel kommer årsmedeltemperaturen stiga betydligt fortare än den gjort tidigare, i Sverige är det möjligt med en ökning på 3-4 grader vid seklets slut. Den snabba klimatomställningen gör att många växter och djur inte har tillräckligt med tid för genetisk anpassning. Att arten lyckas anpassa sig så den överlever i det nya klimatet behöver dock inte betyda att den finns kvar i samma utsträckning då konkurrensförhållandena med andra arter kan ha förändrats (Bernes 2016).

Det andra alternativet är att arten förflyttar sig till ett område där klimatet liknar det där det ursprungligen kom ifrån. En undersökning av en rad olika växt- och djurarters utbredningsområden visar att de under senare tid närmar sig polerna med i genomsnitt 17 km per decennium, men skillnaden mellan olika arter är stor. Klimatförändringarna sker för fort för att hela ekosystem med flora och fauna ska kunna förflytta sig i takt med klimatzonerna. I Sverige kan uppvärmningen innebära att klimatzonerna förflyttar sig med en takt på 50 km per decennium, på andra ställen kan förflyttningen ske betydligt snabbare än så. Även om djur kan förflytta sig snabbare än klimatzonerna är de i de flesta fall direkt eller indirekt beroende av växter för föda eller skydd, vilket begränsar dessa djurarters förutsättningar för att förflytta sig. Det finns få exempel på växtarter som lyckas förflytta sina utbredningsområden med mer än 10 km per decennium (Bernes 2016).

2.8.4 Terrestra exempel

2.8.4.1 *Arter i otakt och förlängd vegetationsperiod*

Vegetationsperioden är den delen på året där dygnsmedeltemperaturen ligger stabilt över en nivå på 5 plusgrader, vilket gör det möjligt för vegetationen att växa. En höjning av medeltemperaturen skulle innebära att vegetationsperioden förlängs i de områdena som nu har så pass kalla vintrar att tillväxten då stannar av markant. I Sverige kan vegetationsperioden komma att förlängas med 1 till 3 månader under innevarande sekel, och växtligheten här kommer då få en ökad tillväxtsång. Alla

arter anpassar inte sin aktiva period på samma sätt, vilket kan leda till att pollinerande insekter inte är aktiva under växternas blomning (Bernes 2016).

2.8.4.2 *Medelhavsregionen som öken*

Medelhavsregionen som idag har ett klimat präglad av torra varma somrar och milda fuktiga vintrar kan vid en minskning av nederbörd och en ökning av medeltemperaturen genomgå dramatiska förändringar genom återkoppling av lokala processer. Blir marken torrare minskar avdunstningen av vatten som begränsar uppvärmningen av marken och det marknära luftlagret. Den minskade avdunstningen skulle kunna medföra ännu en minskning i nederbörd och molnbildning vilket leder till ännu svårare torka med ökad risk för bränder. Många växter som lever där idag skulle dö ut, och de intilliggande ökenområdena är inte lika artrika så även om dessa förflyttar sig till regionen kan artrikedomen reduceras kraftigt. Vissa områden runt medelhavet skulle kunna förvandlas till halv-öken eller öken (Bernes 2016). Detta skulle kunna innebära att människorna som bor i hårt drabbade områden, liksom andra arter, måste anpassa sig eller flytta därifrån.

2.8.4.3 *Svenska kalfjällen beskogade*

De svenska kalfjällen är ett av de mest hotade ekosystemen i Sverige. Trädgränsen definieras som höjdgränsen för träd som är minst 2 m höga. En lokal medeltemperaturhöjning under det senaste århundradet resulterade i att trädgränsen i de södra delarna av fjällkedjan ligger runt 70 höjdmeter högre idag än för hundra år sedan. Även skogsgränsen tycks stiga, men inte lika fort som trädgränsen. Var dessa två gränser går avgörs till stor del av temperaturen. En grads temperaturökning resulterar i att gränserna höjs med runt 150 meter, vilket betyder att den förväntade temperaturökning skulle förvandla kalfjällen till oigenkännlighet då tre fjärdedelar eller mer skulle ligga under trädgränsen eller skogsgränsen. Flera alpina arter riskerar att utrotas om så blir fallet (Bernes 2016).

2.9 Effekter av uppvärmning i havet

2.9.1 Höjd havsnivå

Haven påverkas i stor utsträckning av den globala uppvärmningen. Uppvärmningen kommer inte gå lika fort som på land då det tar längre tid för stora vattenmassor att värmas upp. En effekt som kan komma att få ödesdigra konsekvenser för både samhället och naturen är att havsnivån väntas stiga, och på så sätt förflytta kustlinjerna. Glaciärernas avsmältning och smältande inlandsis på Grönland och Antarktis kan komma att höja havsnivån med 20 – 30 centimeter kommande sekel. En annan faktor som väntas bidra mycket till höjningen av havsnivån är vattnets termiska expansion. Hur mycket havet kan komma att stiga är ännu oklart, men en nivåhöjning mellan 20 och 80 centimeter till slutet av detta sekel är inte osannolikt. Kustekosystem med arter som i normala fall borde kunna anpassa sig i takt med kustlinjens förflyttning hotas att hamna i kläm mellan ett stigande hav och hinder skapade av människan såsom bebyggelse, vägar och annan infrastruktur (Bernes 2016).

Stora befolkningscentra globalt ligger nära kusterna. Många länder är låglänta som t.ex. Nederländerna, Bangladesh och många önationer i Stilla Havet och befolkningen riskerar att behöva flytta till andra länder som klimatflyktingar.

2.9.2 Minskad utbredning av havsis

Havsisens utbredning på Norra ishavet har minskat markant mellan år 1979-2015. Sett över hela året uppskattas minskningen uppgå till 15 %. Istäckets utbredning under september månad var nästan 40 % mindre år 2015 jämfört med samma månad år 1979. Öppet hav absorberar mer värme från solinstrålningen jämfört med istäcket, därför förstärks uppvärmningen när havsisens utbredning minskar (Bernes 2016).

2.9.3 Stabilare termokliner ger risk för syrgasbrist på bottnar

Uppvärmning av sjöar och hav på sommaren gör att det bildas så kallade termokliner, som separerar det uppvärmda ytvattnet från det kallare djupvattnet. Dessa termokliner motverkar vattnets omblandning i djupled och på så sätt försvårar de transporten av syre från ytan vilket kan leda syrebrist längre ned i djupen. Termokliner bildas redan naturligt under de varma perioderna av året, men i ett varmare klimat kan temperaturskiktningen bli mer markant och verka under en större del av året (Bernes 2016). T.ex. hotas Östersjötorskens fortplantning, de känsliga äggen, när det är syrgasbrist i det kallare djupvattnet. Även kallvattensarter av fisk i sjöar kan på liknande sätt påverkas negativt av långa varma somrar.

2.9.4 Korallrevsblekning

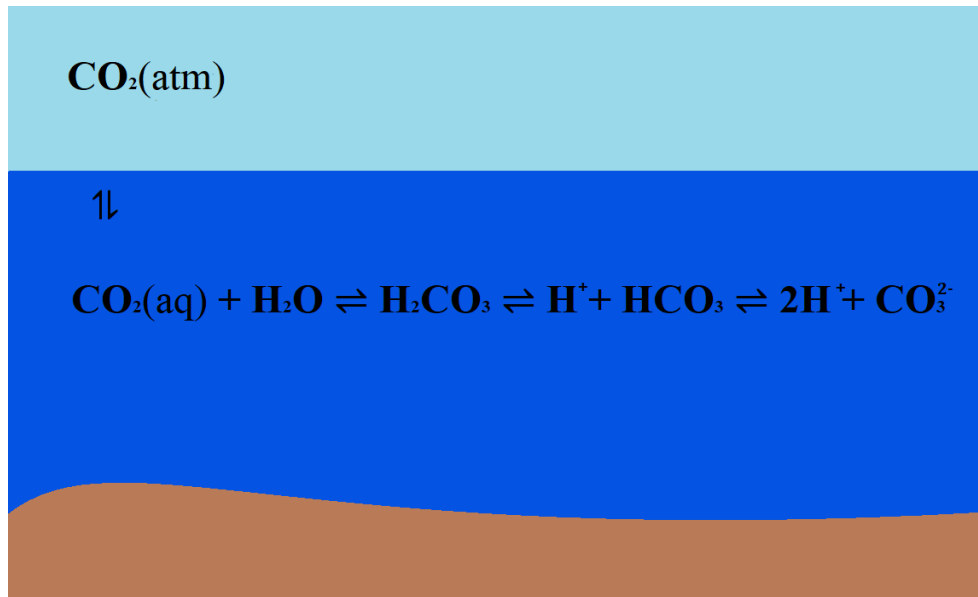
Korallrev har sedan 1980-talet drabbats av massdöd vid ett flertal tillfällen till följd av blekning. Denna korallrevsblekning är en konsekvens av att korallerna i samband med stress vid för höga temperaturer gör sig av med alger som de i normalfall lever i symbios med. Korallerna är beroende av algernas fotosyntes för att kunna växa och överleva och de dör om algerna inte återvänder (Bernes 2016). Uppvärmningen påfrestar inte minst de tropiska korallreven, som redan vid en temperaturhöjning på 1 – 2 grader tar skada (Vásquez-Elizondo & Enríquez 2016). Korallreven är hem till runt en fjärdedel av alla marina arter. De är även viktiga för ett stort antal kustsamhällen som är beroende av reven för sin matförsörjning (Världsnaturfonden 2017). Korallreven bidrar alltså med en viktig ekosystemtjänst i och med att de gynnar matproduktion i form av fisk och skaldjur som lever i habitatet de bildar.

2.10 Havsförsurning – en relativt nyupptäckt effekt av ökad koldioxidhalt

En relativt ny upptäckt är att den ökande halten av CO₂ i luften även påverkar kolsyrasystemet i haven vilket ibland benämns som “det andra CO₂-problemet”. Haven tar upp en stor del av den koldioxid som släpps ut i luften. Haven kan ta upp så mycket som en tredjedel av antropogent producerad CO₂. När haven tar upp CO₂

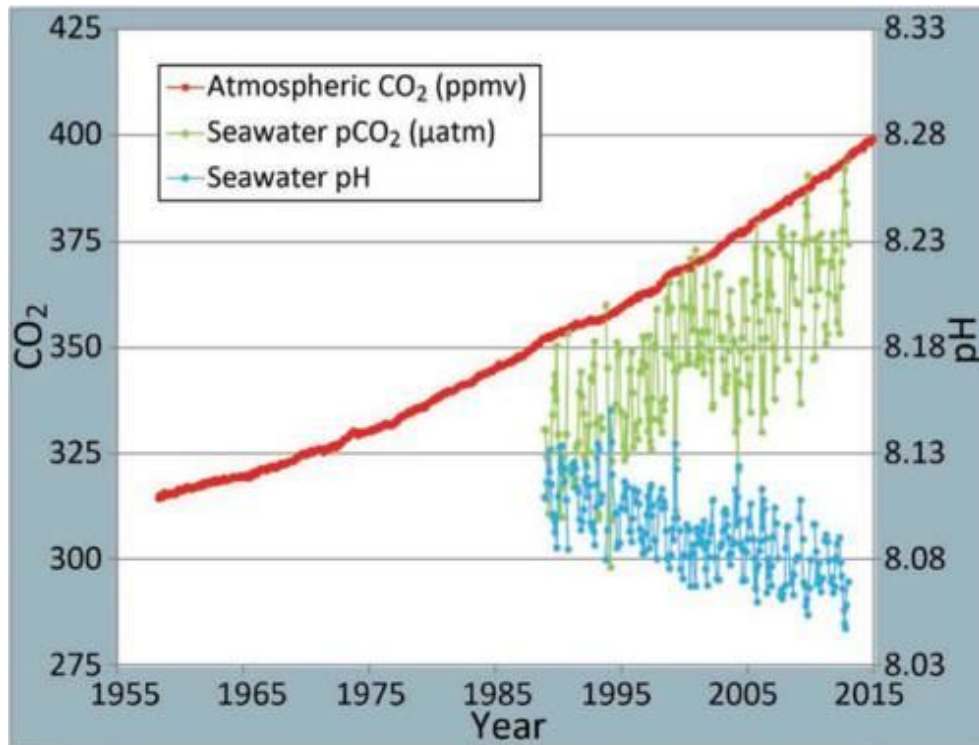
blir pH värdet lägre och det blir en lägre mättnad av kalciumkarbonat i ytvattnet (Doney *et al.* 2009).

Det tar cirka ett år för CO₂ att finna jämvikt mellan halten i havet och luften. När det löst sig i vattnet reagerar CO₂ med vatten för att bilda kolsyra (H₂CO₃) som i sin tur kan släppa en vätejon för att bilda bikarbonat (HCO₃⁻) och karbonatjoner (Figur 11). Reaktionerna är reversibla och i nära jämvikt för havsvatten med ett naturligt pH på ca 8,1 (Doney *et al.* 2009).



Figur 11. Koldioxiden och karbonatets balans i havsvatten

Havets koncentration av CO₂ har mätts sedan början 1800-talet men var bristfälliga till mitten av 1900-talet. Den uppmätta halten atmosfärisk koldioxid, koldioxid i havet samt pH-värdet har under mätningar de senaste 60 respektive 25 åren ändrats dramatiskt (Figur 12). Den beräknade pH-minskningen med 0,3-0,4 enheter under 2000-talet medför en ökning med cirka 150 % av H⁺ och en minskning med 50 % av CO₃²⁻ koncentrationen (Doney *et al.* 2009). Värdet på pH i havet fortfarande högt, över 8 men då hav är mycket mer stabila system än t.ex. sjöar påverkas organismerna som lever i haven ändå.



Figur 12. Atmosfäriskt CO₂ (röd), CO₂ löst i havsvatten (grön) och pH i havsvatten (blå) över tiden (Chan *et al.* 2016).

2.10.1 Havsförsurningens effekter på marina organismer

Flera studier har undersökt och bekräftat CO₂-effekter på t.ex. koraller och hur kolsyrasystemet är kopplat till dessa organismers möjlighet att lagra kalk i form av kalciumkarbonat. Det är särskilt kalkbildningshastigheten för marina skalorganismer som drabbas och det syns i form av att skalerna blir tunna eller porösa (Scott Doney *et al.* 2009). Studier av barriärrevet visar att kalkbildningshastigheten har minskat med 21 % under 1988-2003. På liknande sätt påverkas de röda och gröna algerna som globalt gör lika mycket nytta som korallreven. Andra ryggradslösa djuphavsdjur såsom musslor, krabbor och andra skaldjur vars skal är uppbyggd av kalcium påverkas också i varierande grad av förändringar i halten CO₂. Skador man ser är bland annat hämrad skaluppbyggnad, reproduktion och deformerade avkommor. I studier av kalkbildning hos vissa plankton, foraminiferer, har visats minskad skalmassa med 4-14 % jämfört med förindustriella kontroller och vid de förhållanden som scenarierna förutspår för år 2100 har fullständig upplösning av skalerna påvisats i experiment (Doney *et al.* 2009). Foraminiferer har en viktig roll, de utför en ekosystemtjänst, i och med att de hjälper till att binda CO₂ till sitt skal i ytvattnet och sedan när de dör sedimenterar skalerna till djuphaven och hjälper till att lagra CO₂ i bunden form.

Några organismgrupper gynnas av havsförsurning och det är cyanobakterier som i studier har visat vara oförändrade eller ha ökat sin fotosyntes. Det beror på att de är bra på att utnyttja CO₂ direkt till skillnad från många andra alger som vill ta upp

oorganiskt kol i form av bikarbonat, en anpassning till högt pH då bikarbonat dominerar i haven. Cyanobakterier är en gammal organismgrupp som utvecklades då haven var surare och koldioxid var den dominerade formen av löst oorganiskt kol i haven. De kvävefixerande cyanobakterierna har visat på mer fixering av kol och kväve vid högre CO₂-halter. Även sjögräs gynnas av denna förändring i CO₂ men hämmas av temperaturförändringar (Doney *et al.* 2009).

Eftersom organismgrupper påverkas så olika är förändringar av hela ekosystem att vänta vid ökad havsförurning. Vid en studie som undersökte havsekosystemet i närheten av vulkaniska undervattensutsläpp av CO₂ uppmätte man låga pH-värden, avsaknad av koraller, kraftig minskning av sjöborrar, kalkalger och snäckor. Däremot var området dominerat av sjögräs och invasiva arter (Doney *et al.* 2009). Detta är bara ett exempel på de förändringar i näringskedjan som kommer kunna bevitnas i framtiden.

2.11 Åtgärder för att minska koldioxidutsläpp

Förutom att förbränna mindre fossila bränslen och mindre över huvud taget har det också börjat utvecklas tekniker att ta hand om koldioxid och metan från punktutsläpp. Ett sätt att hindra växthusgasen koldioxid från att läcka ut till atmosfären är genom Carbon Capture and Storage (CCS) eller, på svenska, geologisk lagring av koldioxid. CCS är en metod vars huvudsyfte är att lagra koldioxid från utsläpp vid olika industriella processer och fossil elproduktion. Detta hindrar koldioxiden från att släppas ut till atmosfären och tekniken har visat sig kunna samla in upp till 90 % av utsläppen från fossil elproduktion och industrier. (Carbon Capture and Storage Association 2018). CCS-tekniken består av tre delar: insamling, transport samt lagring av koldioxid vilket görs antingen under marken i olja- eller gasfält eller i djupa akvifärer. I det första steget, alltså insamling av koldioxid, används teknik som separerar koldioxid från gaser som produceras vid elproduktion och industriella processer. Det andra steget, alltså själva transporten av koldioxid, görs via rörledningar eller fartyg och det tredje steget, förvaringen, görs i utvalda bergartsformationer som oftast är flera kilometer under jordytan (Carbon Capture and Storage Association 2018). Användande av CCS i kombination med förnybar biomassa (BECCS) är en vidareutveckling av kollagringstekniken som anses kunna ge minusutsläpp av koldioxid.

2.11.1 Exempel på användningsområden för CCS

CCS är den enda metoden som kan reducera koldioxidutsläpp från industrier med utsläpp. Några exempel på industrier som använder CCS är naturgasbehandling, produktion av kemikalier såsom gödselmedel innehållande kväve och väte, kolför-gasning samt järn. Även globala stål- och cementindustrier utvecklar CCS för sin produktion. Teknologin för att infånga, transportera och lagra koldioxid har prövats av mer än tolv projekt världen över (Global CCS Institute 2016) men är fortfarande inte använd i stor skala.

2.11.2 Risker med CCS

CCS är en metod som tagits fram av främst kolindustrin för att man ska kunna fortsätta ta upp fossila bränslen för storskalig förbränning. Vid en storskalig satsning på CCS ökar risken för ökad användning av fossila bränslen. Metoden kräver dessutom ytterligare energi och är mycket dyr.

I slutna miljöer är höga koldioxidhalter toxiska eller dödliga för alla levande organismer. I alla tre stegen i CCS-metoden finns denna risk. Lämpliga akviferer för koldioxidlagring finns inte överallt, varför transport (lastbil, fartyg, pipelines) oftast behövs.

Vid inlagringen kan koldioxid läcka ut till grundvatten och atmosfären. Snabba och kraftiga koldioxidläckage (exempelvis vid jordskalv) kan orsaka dödsfall på både människor och andra organismer på land och i hav. Själva inlagringen av koldioxid ökar trycket i berggrunden och kan i sig utlösa mindre jordskalv. I saltgruvor kan koldioxiden tränga ut saltvatten till grundvattenakviferer.

2.12 Koppling till svenska och globala mål

2.12.1 Svenska miljömål

Sveriges miljömål sattes upp 1999 och fungerar som riktmärke för landets miljöarbete. Det finns sexton miljömål varav framför allt två av dem har en tydlig koppling till vad användandet av fossila bränslen innebär för klimatet och växthuseffekten (Sveriges miljömål 2018a).

Begränsad klimatpåverkan-målet handlar om den globala uppvärmningen och för att bromsa upp den har Sveriges riksdag beslutat att landet inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till år 2045 (Sveriges miljömål 2018b). För att nå dit finns det två delmål, den så kallade Energiöverenskommelsen, vilka är 50 % effektivare energianvändning 2030 jämfört med 2005 och 100 % förnybar elproduktion innan 2040 (Regeringskansliet 2018). Som det ser ut nu kommer detta miljömål dock inte att nås eftersom minskningen av växthusgasutsläpp sker för långsamt (Sveriges miljömål 2018b).

Bara naturlig försurning-målet handlar om att förbränningen av fossila bränslen leder till att försurningen accelereras och eftersom utsläppen kan färdas över landsgränser är samarbeten inom Europa av högsta vikt. Utsläppen av svaveldioxid och kväveoxider är i fokus i detta miljömål och dessa utsläpp behandlas i kommande kapitel. (Sveriges miljömål 2018d). Den relativt nyupptäckta havsförsurningen tas inte upp av något svenskt miljömål och det är en brist som skulle behöva åtgärdas.

2.12.2 FN:s globala mål

Av de sjuutton målen är det främst två som kan kopplas till användandet av fossila bränslen och dess inverkan på klimatet och växthuseffekten (UNDP 2018a). Opinionsen kring miljön sprider sig över hela världen vilket märks tydligt i FN:s globala klimatkonventioner. Ett exempel är mål 13 där det står: ”13.2 Integrera klimatåtgärder i politik, strategier och planering på nationell nivå”. Dock ses inte denna utveckling globalt - snarare motsatsen. Trots att klimatkonventionerna och andra internationella överenskommelser ökar efterfrågan på förnybart så växer också den fossila konsumtionen, till stor del på grund av de nationer som konsumerar mest, såsom Kina. Kina är en extremt stor konsument som nation, den största i världen, men även en stor exportör globalt. Exempelvis växte den totala energikonsumtionen i världen med 2,6 procentenheter 2017, att jämföra med 1,1 procentenheter 2016. Till stor del berodde detta på Kinas ökade efterfrågan på energi. Landets energikonsumtion består till 88 % av fossila bränslen (Globala målen 2018, Enerdata 2018).

Mål 7, hållbar energi för alla, handlar om att alla världens invånare ska ha stabil tillgång till ren energi även när efterfrågan ökar i framtiden. Med detta mål hoppas man kunna påskynda omställningen till mer hållbara energilösningar genom att öka andelen förnybar energi, effektivisera energianvändningen och främja forskning inom området (UNDP 2018b).

Mål 13, Bekämpa klimatförändringen, fokuserar på vad förbränningen av fossila bränslen innebär för klimatförändringen. För att motverka den globala uppvärmningen ska klimatåtgärder integreras i politiska beslut, medvetenheten ökas hos befolkningen och beredskapen för klimatrelaterade katastrofer stärkas (UNDP 2018c).

2.13 Instuderingsfrågor

- Ger kol, olja eller naturgas lägst koldioxidutsläpp per energienhet?
- Vad är CCS och hur går det till?
- Nämn fem vanliga växthusgaser och beskriv hur de bildas naturligt och artificiellt samt deras uppehållstider.
- På vilka två sätt kan arter anpassa sig till klimatförändringar?
- Beskriv CO₂ - karbonatets balans i havet och nämn några av de kemiska konsekvenser ökad atmosfäriskt CO₂ har på denna balans.
- Hur påverkas marina organismer av havsförsurning? Beskriv hur och nämn några organismer som gynnas samt missgynnas av denna förändring?
- Beskriv kolets kretslopp översiktligt.
- Vad är proxydata?
- Varför är vissa gaser växthusgaser och andra inte?

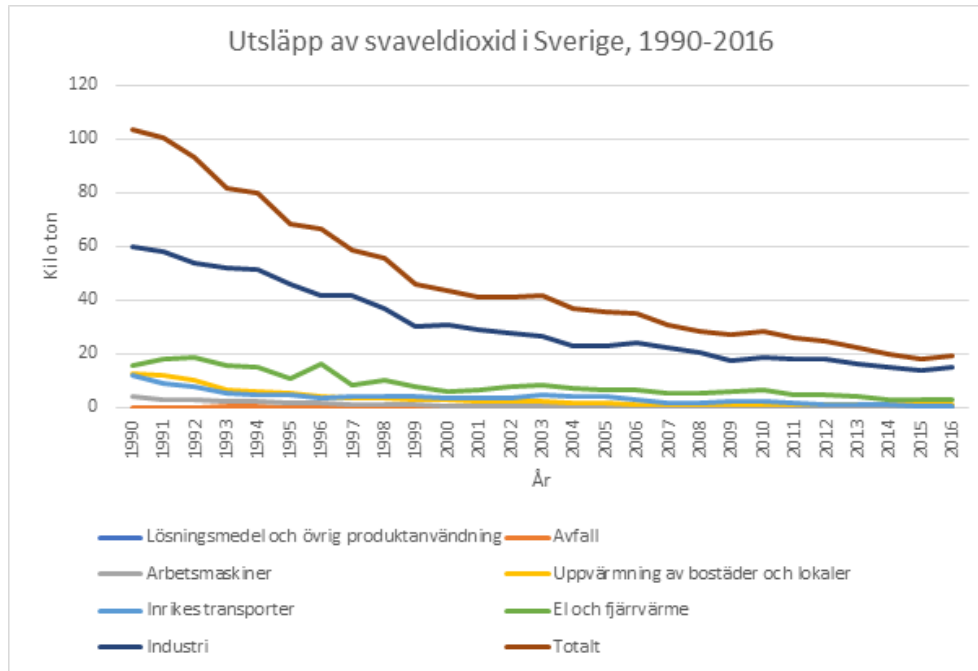
3 Förbränning med fokus på svavel- och kväveförsurning

Försurning innebär att markens och vattnets pH-värde minskar över tiden. Detta sker när positivt laddade vätejoner tillförs mark och vattendrag genom syror i högre takt än vad de bortförs. Sådana syror kan antingen härstamma från naturliga processer eller antropogena försurningskällor. Försurning orsakas främst av nedfall av svavel och kväve från förbränning av organiskt material. Förbränning av fossila bränslen bidrar särskilt till antropogen försurning, bland annat genom att svavel- och kväveföreningar, som varit bundna till det organiska materialet, frigörs och bildar svavel- och kväveoxider. Dessa föreningar kan sedan via rökgaser spridas över stora områden och medföra att mark- och vattenområden försuras.

3.1 Svavel-emission och deposition i Europa och Sverige

Svavelemissioner kommer till stor del från förbränning av fossila bränslen. I Sverige, såväl som i övriga Europa, ökade emissionen av svavel efter andra världskriget på grund av ökad användning av olja. Under 1960-talet började man förstå att försurning var ett problem som behövde åtgärdas. När effekterna av de ökade utsläppen av svavel uppenbarades i form av försurning, har man därefter försökt minska på utsläppen. Detta har lett till att depositionen av svavel har sjunkit de senaste decennierna, men problemen kopplade till svavelutsläppen kvarstår dock fortfarande i hög grad i form av bland annat försurade sjöar (Gustafsson *et al.* 2010).

I Sverige var svavelutsläppen som störst under 1970-talet och har därefter minskat kraftigt. Efter 1980 har utsläppen minskat med över 90 % och i Europa med över 70 %. Minskningen beror på ett antal olika faktorer, men bland annat att man börjat använda mer naturgas som har ett lägre svavelinnehåll än kol och olja. Reningen av rökgasutsläppen har även effektiviserats vilket bidrar till minskade utsläpp (Havs- och vattenmyndigheten 2014). I Figur 13 visas utsläppen av svaveldioxid i Sverige från 1990 fram till 2016. Det är från grafen tydligt att utsläppen har minskat kraftigt. Den visar även att den klart största utsläppskällan är industrin.

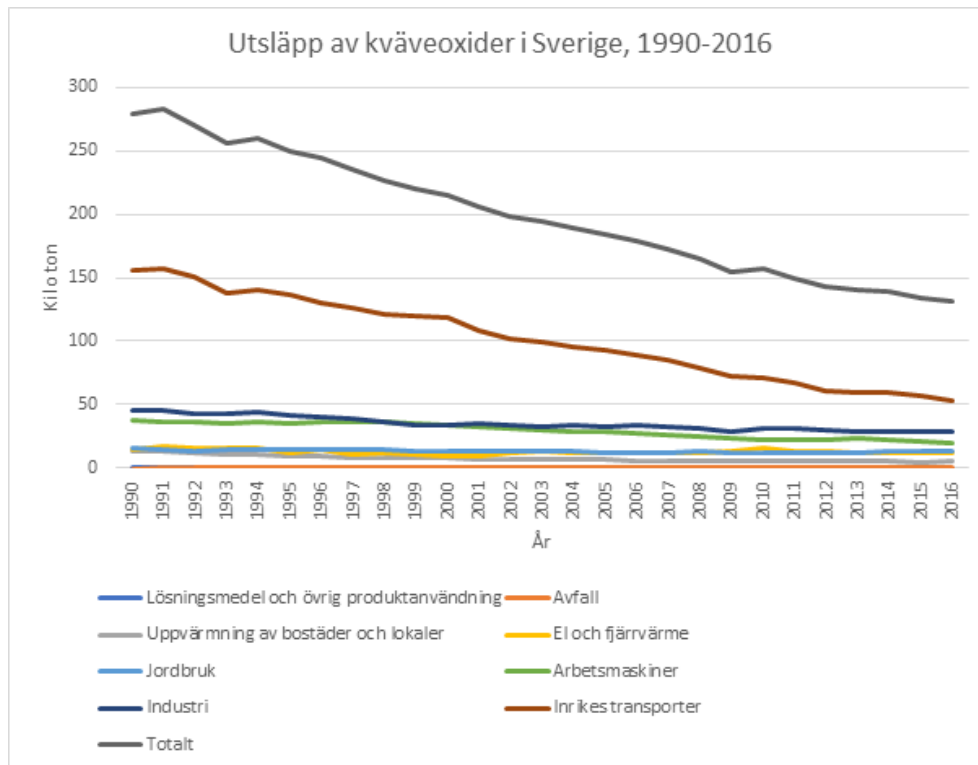


Figur 13. Utsläpp av svaveldioxid i Sverige mellan åren 1990 och 2016. Grafen visar utsläppen från olika sektorer samt även totala utsläppen. Källa: Naturvårdsverket 2017c.

Nedfall av svavel i Sverige är inte bara beroende av utsläppen i Sverige, utan kommer även från utsläpp i övriga Europa eftersom partiklar från utsläppskällor nere på kontinenten transporteras till Sverige. Nedfallet är störst i de sydvästra delarna av landet, vilket har att göra med just närheten till kontinenten samt att nederbörden är större där än i övriga landet. I samtliga delar av Sverige har nedfallet minskat stadigt (med undantag för 2014 då ett vulkanutbrott på Island orsakade ett större nedfall) på grund av kraftigt minskade utsläpp såväl i Sverige som i övriga Europa. Nedfallen från år till år varierar dock lite vilket kan bero på varierande nederbörds-mängd. Skillnaderna i nedfall mellan de olika delarna av landet minskar också och den största minskningen (både procentuellt och i absoluta tal) har skett i sydvästra Sverige (Sveriges miljömål uå).

3.2 Kväveemission och deposition i Europa och Sverige

Kväveemissioner kommer från all typ av förbränning men även från jordbruket. Medan svavelemissionerna har minskat kraftigt de senaste decennierna i såväl Sverige som övriga Europa, har kväveemissionerna inte minskat på samma sätt. Att minskningen av kväveemissioner inte är lika markant har bland annat att göra med den ökande trafiken, vilken bidrar till kväveutsläpp (Havs- och vattenmyndigheten 2014). I Figur 14 visas utsläppen av kväveoxider i Sverige från 1990 fram till 2016. Även utsläppen av kväveoxider har minskat stadigt men dock inte i samma utsträckning som utsläppen av svaveldioxid. Den klart största källan till utsläppen är transporter.



Figur 14. Utsläpp av kväveoxider i Sverige mellan åren 1990 och 2016. Grafen visar utsläppen från olika sektorer samt även totala utsläppen. Källa: Naturvårdsverket, 2017d.

3.3 Miljökvalitetsnormer för svavel- och kväveoxider

I syftet att tillsammans jobba för en minskning av luftförorening i Europa har EUs medlemsstater kommit överens om olika miljökvalitetsnormer angående skadliga utsläpp: den Europeiska Luftkvalitetsförordningen (SFS 2016:831). Målet är att kartlägga förändringar i luftkvalitén för att kunna bedöma vilka åtgärder som behövs för att säkerställa människors hälsa. Dessutom ska befolkningen kunna ta del av all information. Överskrider de bestämda tröskelvärden för ett visst ämne, ska miljöförbättrande åtgärder tas (Europaparlamentets och rådets direktiv 2008/50/EG).

3.3.1 Gränsvärden för svaveldioxid i utomhusluft

Dessa värden får inte överskridas för svaveldioxid (SFS 2016:831):

- Timmedelvärde: 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ och timme (får bara överskridas 175 gånger per år och nivån får inte överstiga 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ och timme fler än 24 ggr)
- Dygnsmedelvärde: 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ och dag (får bara överskridas 7 ggr per år och nivån får inte överstiga 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ och dag fler än 3 ggr)

För att skydda växter gäller istället särskilda föreskrifter för följande områden: platser som ligger minst 20 km från närmaste tätbebyggelse eller minst 5 km från övriga byggnader (SFS 2016:831):

- Vintermedelvärde (1 oktober – 31 mars): $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och vinterhalvåret
- Årsmedelvärde: $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och år

3.3.2 Gränsvärden för kvävedioxid i utomhusluft

Dessa värden får inte överskridas för kvävedioxid (SFS 2016:831):

- Timmedelvärde: $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och timme (får bara överskridas 175 ggr per år och nivån får inte överstiga $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och timme fler än 18 ggr)
- Dygnsmedelvärde: $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och dag (får bara överskridas 7 gånger/år)
- Årsmedelvärde: $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och år

3.4 Transformeringsprocesser

Kemiska transformeringsprocesser innebär att ämnena kväve och svavel bildar starka syror, som i sin tur avger vätejoner genom våt- eller torrdeposition. Svavel är en grundläggande beståndsdel i alla levande organismer och finns därmed lagrad i all biomassa som samlas i marken när växter och djur och växter dör. För fossila bränslen har denna lagring skett för länge sedan. Genom vittring och sedimentering kommer biomassan och de olika ämnen den består av återigen upp till jordytan och återförs till kretsloppet. I och med att människan började använda sig av fossila bränslen för energiutvinning, påskyndades återföringsprocessen enormt (Fyrisåns Vattenförbund 2007).

Första steget vid svavlets transformeringsprocess är att ämnet vid förbränning omvandlas till svaveldioxid. Detta oxideras därefter till svaveltrioxid, varvid dess oxidationstal ökar från +IV till +VI. När en svaveltrioxidmolekyl reagerar med en vattenmolekyl bildas slutligen svavelsyra (Gustafsson *et al.* 2008). En mera noggrann beskrivning av de kemiska reaktionerna följer i avsnitt 3.7.1.

Kväve finns i stor koncentration i luften i form av kvävgas som är en relativt inert gas. Förbränningsreaktionerna leder dock till att luftens kväveatomer, liksom svavelatomerna, oxideras. Reaktionen av kväveoxider med vatten ger i detta fall upphov till bildandet av salpetersyra (se även avsnitt 3.7.2).

3.5 Våt- och torrdeposition

Emissionerna av svavel och kväve i atmosfären kan återföras till marken eller vatten på två olika sätt, via våtdeposition och torrdeposition. Våtdeposition innebär att ämnena transporteras i nederbörden, därför pratar man t.ex. om ”surt regn” (Nationalencyklopedin uå a). Vid torrdeposition sker transporten via luften, i form av gas eller små partiklar (Nationalencyklopedin uå b).

Sambandet mellan förbränning av fossila bränslen till industriella ändamål och förorening blir särskilt tydlig när man kollar på utvecklingen av våtdeposition av

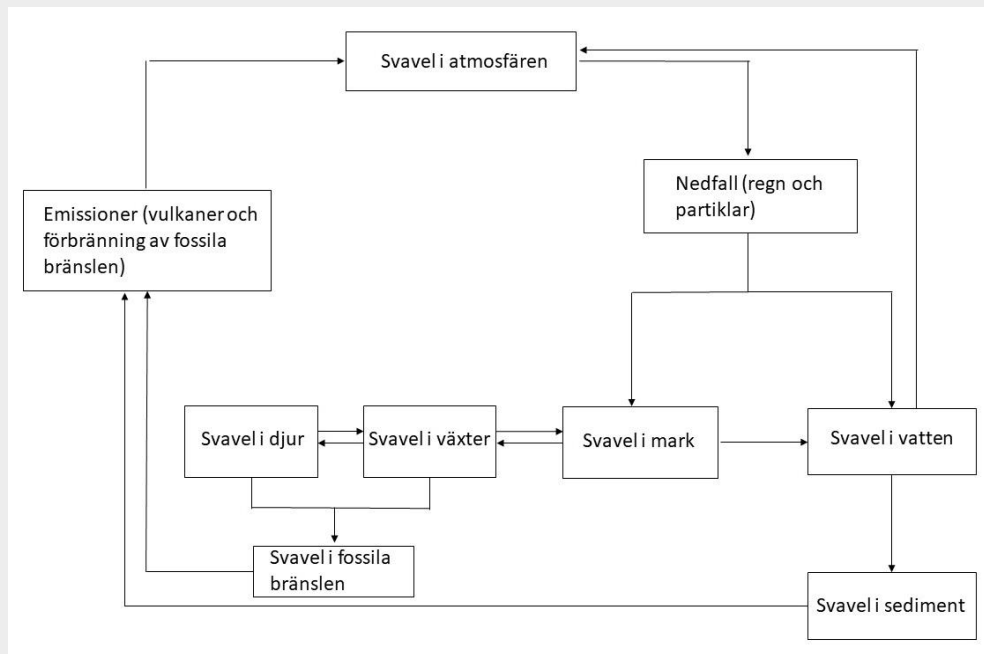
kväve och svavel genom åren. Mätningarna på svavel- och kvävehalten i nederbörden vid den engelska staden Rothamsted uppvisar en ökande trend i den årliga kväve- och svaveldepositionen från 1850 till 1980, då behovet av förbränning till energiutvinning ökade drastiskt i och med industrialiseringen (Goulding *et al.* 1997). Genom att ersätta kol med naturgas runt 1980 minskade våtdepositionen av båda ämnena. Svaveldepositionen påverkades mest av detta bränslebyte. Koncentrationen gick upp från inledningsvist 5 kg/ha och år till 25 kg/ha och år när depositionen var som mest och minskades efter bytet av energislag återigen till ca 5 kg/ha och år för år 2000. Kvävedepositionen följer samma trend dock med en betydligt mindre amplitud: från 1 kg/ha och år upp till 8 kg/ha och år och slutligen ca 3 kg/ha och år vid året 2000. Det var också en tydlig säsongsvariation i torrdepositionen. För kvävedioxid uppmätts den största koncentrationen i luften under vintertiden, och som förklaring anges det ökade uppvärmningsbehovet av lokaler. Detta gäller UK men liknande samband mellan kyla och förbränningsrelaterad uppvärmning finns även i Sverige. Mer om vedeldning i Sverige finns i kapitel 4.4. Förutom halten av kvävedioxid är även bland annat ammoniak och salpetersyra relevanta vid mätningar av torrdeposition (Goulding *et al.* 1997).

3.6 Svavlets kretslopp

Svavlets kretslopp

I svavlets kretslopp ingår dels en naturlig del, där utsläppen kommer från till exempel vulkaner, och dels en antropogen del som påverkas av mänsklig aktivitet och där utsläppen kommer från förbränning av fossila bränslen, i vilka svavel finns bundet. Efter att svavlet kommit ut i atmosfären sker nedfallet både som torrdeposition i form av partiklar (bland annat ammoniumsulfatpartiklar) och som våtdeposition via regn i form av utspädd svavelsyra.

När det gäller den antropogena andelen står industrin för 78 % av utsläppen av svaveldioxid i Sverige. Ungefär två tredjedelar av dessa kommer från industrins processer och resten kommer från förbränning. El- och fjärrvärmeproduktion står för cirka 15 % av utsläppen.



Källa: Gustafsson *et al.* 2010, Naturvårdsverket 2017c

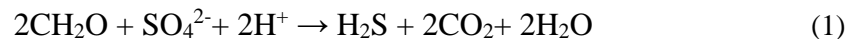
3.7 Försurning av mark och vatten

3.7.1 Svavelförsurning av mark och vatten

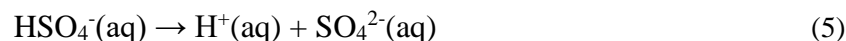
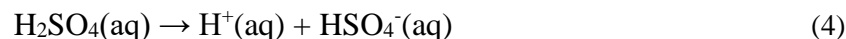
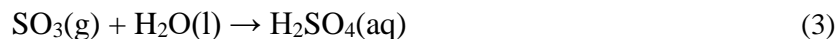
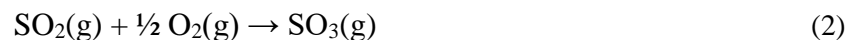
Utsläpp av svavelföreningar, främst SO_2 , är en av de största orsakerna till försurning av mark och vatten. Svaveldioxid sprids till atmosfären både från naturlig och från antropogena källor. Den främsta utsläppskällan från mänskliga aktiviteter kommer från förbränning av fossila bränslen, speciellt kol (Cann & Colin 2008). Det beror på att kol innehåller 1-6 % svavel, beroende på den geografiska platsen

där kolet utvinns. Vanligtvis är hälften eller mer av denna svavelmängd fast i inneslutningar i kolet och kan tas bort genom att man pulvriserar kolet innan det används till förbränning. Allt går dock inte att få bort och förbränning av fossila bränslen kommer att ge svavelutsläpp.

Att det finns mer svavel i fossila bränslen än t.ex. biobränslen beror på bildningsprocessen, när det organiska materialet lagrades som torvlager i till exempelvis havsvikar. Miljön blev snabbt anaerob, och nedbrytning av materialet med syre som oxidationsmedel kunde inte fortsätta. Men det fanns en viss bakteriell nedbrytning som kunde fortsätta, med sulfat som oxidationsmedel (Gustafsson *et al.* 2008). Processen såg ut som följande:



Det är alltså svavelsyra som binds in i processen och blir till svavelväte. Med tiden har sedan svavelvätet ombildats till pyrit (svavelkis) eller svaveljärn. Vid fossil förbränning kommer dessa svavelföreningar frigöras till atmosfären. Den processen består utav ett flertal steg och tar ungefär en till två dagar i atmosfären. Vanligtvis vid förbränningen bildas först svaveldioxid, SO_2 , som sedan oxideras till svaveltrioxid, SO_3 , och som kommer ta upp en vattenmolekyl och bilda svavelsyra. Det är sedan svavelsyran som når mark och vatten och orsakar försurning (Gustafsson *et al.* 2008). Processen ser ut som följande:



Det finns olika buffrings- och neutraliseringsreaktioner som sker när svaveldepositionen når marken för att förhindra försurning. Katjonbyte är en sådan process och beskrivs närmare i avsnitt 3.7.4.

En annan buffrings- och neutraliseringsreaktion i marken är sulfatadsorption. Det sker i den delen av marken där det bildats sekundära mineral, även kallat för B-horisonten eller anrikningshorisonten. För podsol, som är Sveriges vanligaste jordmån, är den i rostjorden. Sulfat, SO_4^{2-} binds till ytor i rostjorden genom *adsorption* (Bertills & Warfvinge 2000). När en sulfat-molekyl binds kommer en vätejon att konsumeras vid mineralytan och på så vis buffrar sulfatadsorption markvattnet mot försurning. Men det finns en jämvikt mellan mängden sulfat som har adsorberats och mängden sulfat som finns i lösningen, vilket innebär att om sulfatdepositionen minskar kommer man få *desorption*. På samma sätt som adsorptionen buffrar mot försurningen kommer desorptionen att buffra mot återhämtning. Det är alltså en reversibel process. Markens förmåga att adsorbiera sulfat är pH-beroende, ju lägre pH man har desto mer sulfat kommer kunna adsorberas.

Svavelförsurningen har lett till ett försvagat eller obefintligt buffertsystem i marken. Konsekvenser som har kommit med det är en urlakning av mineralnäringsämnen i marken och ett sjunkande pH-värde. I sjöar och vattendrag har konsekvenserna även där blivit lägre pH-värden samt förhöjda halter av aluminium (Bertills & Warfvinge 2000).

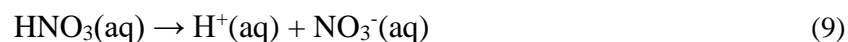
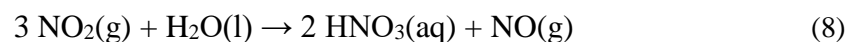
3.7.2 Kväveförsurning av mark och vatten

Utsläpp av kväveföreningar är, precis som utsläpp av svavelföreningar, en av de största orsakerna till försurning av mark och vatten. Kvävet har ett naturligt kretslopp där kvävefixerande organismer tar kvävgas från atmosfären och omvandlar det till kväveföreningar som tillförs i marken. Det är en livsnödvändig process eftersom vegetationen behöver kväve, och den medför ingen nettoproduktion eller konsumtion av vätejoner. Försurningseffekterna i mark och vatten kommer istället från deposition och utlakning av kväve (Gustafsson *et al.* 2008).

Utsläpp från mänskliga aktiviteter kommer från jordbruket samt från förbränning i till exempel motorer. Jordbruksutsläppen är ammoniakgas, NH_3 , som kommer från välgödslade kalkhaltiga jordar och från stallgödsel (Gustafsson *et al.* 2008). Ammoniakgasen reduceras sedan till ammonium, NH_4^+ , i atmosfären. Kväveoxider bildas när bränslen förbränns i en motor under hög temperatur. En del kommer från oxidation av kväveatomer i själva bränslet, men största delen är från oxidation av kvävet i atmosfären (Cann & Colins 2008). Syret och kvävet i luften som utsätts för den höga temperaturen genomgår följande reaktion:



Reaktionen har en väldigt hög aktiveringsenergi och behöver därför höga temperaturer för att ske, som t.ex. är fallet vid förbränning i bilars motorer, speciellt när de körs i höga hastigheter, samt i kraftverk (Cann & Colins, 2008). En del av kväveoxiderna kommer att oxideras till kvävedioxider, NO_2 , när de släpps ut i atmosfären. Kväveoxider och kvävedioxider refereras ofta till som NO_x -gaser. Dessa gaser kommer att oxideras i atmosfären till salpetersyra. Processen ser ut som följande:



I flertalet av de svenska ekosystemen regleras primärproduktionen på land av näringsämnet kväve. Det betyder att nästan allt kväve som deponeras kommer tas upp av vegetationen i området (Bertills & Warfvinge 2000). Som nämnt tidigare deponeras kväve i form av NO_3^- eller NH_4^+ . När vegetationen tar upp nitrat är det i utbyte med en hydroxidjon, och när ammonium tas upp är det i utbyte av en vätejon. Det innebär att så länge som nitrat och ammonium finns i lika stora mängder blir

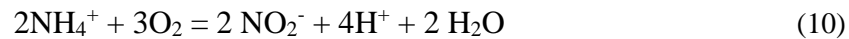
slutprodukten av utbytena vatten och ingen försurning sker. De försurande effekterna från kvävedeposition fås om man har utlakning av nitrat från marken, eller om man får ett ökat kasketjonsupptag på grund av gödslande effekter från kvävet. Man får därför nitratutlakning och försurning om depositionen överstiger vegetationens nettoupptag.

I sjöar och sötvattendrag är vanligtvis inte kväve det begränsade näringsämnet som i mark, utan det är ofta fosfor. Då ger ökade kvävemängder endast små effekter, dock minskar tillförseln av fosfor till sötvattnet om den kringliggande marken är försurad. Det sker då en minskad produktion och näringsomsättning i vattnet, även kallat för oligotrofiering (Gustafsson *et al.* 2008), vilket alltså är motsatsen till eutrofiering - övergödning.

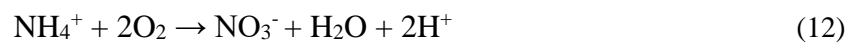
3.7.3 Naturlig försurning

Det finns ett antal naturliga orsaker till att mark och vatten försuras. Naturliga försurningsprocesser har ofta ett långsammare förlopp än antropogen försurning (Laudon *et al.* 2001). Nedan följer en kortfattad beskrivning av fem biologiska processer som orsakar naturlig försurning av mark och vatten:

Nitrifikation är en viktig del av kvävet kretslopp och innebär kortfattat oxidation av ammonium, NH_4^+ , till nitrat under aeroba förhållanden i marken. I oxidationens första steg bildas surgörande vätejoner när ammoniumjoner oxideras till nitrit, NO_2^- , av mikroorganismer. Det andra och sista steget i nitrifikationen är en neutral oxidation av nitrit till nitratjoner, NO_3^- . Kemisk formel för nitrifikation först till nitrit sedan vidare till nitrat:



Eftersom nitrit vid normala förhållanden övergår till nitrat i samma takt som den bildas, förenklas oftast de två formlerna ovan till:



Den försurande effekten vid nitrifikation kan mildras om nitraten tas upp av växter, eftersom en av de två vätejonerna då neutraliseras (Nilsson *et al.* 2007).

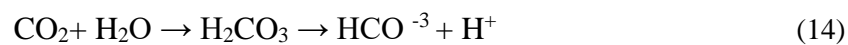
Oxidation av sulfidsvavel i marken bidrar till försurning på samma sätt som vid nitrifikation och efterföljande utlakning av nitrat (Skjellberg *et al.* 2001) enligt följande kemiska formel:



Växters och mikroorganismers katjonupptag. Växter och mikroorganismer tar upp näringsämnen i form av *katjoner* (växter och mikroorganismer tar även upp *anjoner*, men katjonupptaget dominerar), främst fosfor, kväve, kalcium, kalium och

magnesium. I utbyte mot dessa katjoner avges vätejoner, vilket försurar marken. En hög tillväxt innebär ett stort upptag av näringsämnen och således en hög försurningsprocess (Havs- och vattenmyndigheten 2014). Växter har olika försurande verkan i förhållande till sin tillväxt, till exempelvis tar barrträd upp mer katjoner än lövträd och bidrar därför med en högre grad till försurning (Brandtberg & Simonsson 2005).

Kolsyrabildning och produktion av organiska syror. Vid fullständig nedbrytning av organiskt material och vid rotandning bildas koldioxid. Vid högt koldioxidtryck i marken reagerar koldioxid med vatten och bildar kolsyra som upplöses till bikarbonatjoner och vätejoner (Brandtberg & Simonsson 2005) enligt följande kemiska formel:



Organiskt material som inte bryts ned fullständigt bidrar till ett växande humuslager på marken. I detta humustäcke ingår organiska syror som, beroende på dess sammansättning, avger vätejoner (Lindell 2005).

Utlakning av baskatjoner. Baskatjoner är en positivt laddad jon med alkalisk (basisk) reaktion. Vanliga baskatjoner i marken är kalcium (K^+), magnesium (Mg^{2+}) och kalium (Ca^{2+}). Koncentrationen baskatjoner i marken beror bland annat på markens förmåga att binda katjoner. Utlakning av baskatjoner innebär att markens *basmättnadsgrad*, det vill säga andelen utbytbara katjoner som utgörs av baskatjoner, sjunker och marken försuras (Nilsson *et al.* 2007).

3.7.4 Vittring och jonbytesprocesser

Vittring innebär att mineraler i marken, såsom fältspat, glimmer och kalcit, löses upp. De lösta reaktionsprodukterna tillförs sedan det omgivande markvattnet, vilket ökar dess buffertkapacitet och halt av baskatjoner. Förutom kemiska processer innefattar även begreppet vittring fysikaliska processer som till exempel vind, vatten och is. Dessa yttre faktorer påverkar bergarters struktur som mineraler bygger upp (Bertills & Warfvinge 2000).

Kemisk vittring är den process som avgör markens långsiktiga motståndskraft mot försurning eftersom det är ett irreversibelt förlopp som sker med relativt konstant hastighet. Vittringshastigheten avgör hur snabbt utbytbara katjoner kan återskapas och beror bland annat på mineralens egenskaper och markens sammansättning. Vätejoner konsumeras i många kemiska vittringsreaktioner, därför leder en hög koncentration av vätejoner, det vill säga ett lågt pH-värde, till ökad vittringshastighet (Gustafsson *et al.* 2008).

Jonbytesprocesser är, till skillnad från vittringsprocesser, reversibla och relativt snabba processer. Det finns baskatjoner som är elektrostatiskt bundna till organiskt material och lerpartiklar som har en negativ laddning på sin yta. Baskatjonerna kan bytas ut mot till exempelvis vätejoner från svavelsyra. Genom att binda vätejonerna

elektrostatiskt med markpartiklar avstannar försurningen. De utbytta baskatjonerna kan till exempel vara Ca^{2+} , Mg^{2+} och K^+ , och kan istället tas upp av växter som näring. Således har jonbytesprocesser en stor betydelse för markens och vattnets pH och dess buffertförmåga, det finns dock en gräns på hur många positivt laddade joner som marken kan innehålla, utbyteskapacitet. När den gränsen är nådd kommer inte flera vätejoner kunna bindas och effekten av det blir försurning (Mattson 2018).

3.7.5 Aluminium-mobilisering

Aluminiums löslighet i mark är pH-beroende. Vid lågt pH-värde, omkring 4,5, frigörs aluminiumjoner enligt den kemiska reaktionen (Brandtberg & Simonsson 2005):



Aluminiumbuffringen ökar markens *basmättnadsgrad* och därmed dess motståndskraft mot försurning. Denna process innebär även att en ökad koncentration av aluminiumjoner når mark- och grundvatten, vilket har en toxisk effekt på natur och djurliv (Gustafsson *et al.* 2008). Effekterna av aluminiummobilisering beskrivs närmare i avsnitt 3.8 & 3.9.2.

3.8 Effekter av försurning på land

3.8.1 Effekter på växter

När marken försuras minskar halterna av kalium-, magnesium-, natrium- och kalciumjoner (baskatjoner) och halterna av aluminium i sin lättlösligaste form ökar i jordlösningen vilket är skadligt för många organismer som lever i marken (Naturvårdsverket 2017b). I vanliga jordar med normalt pH förekommer aluminium främst bundet till beståndsdelarna i marken som ex. organiska material eller lera. Normalt sett finns det i jordarna organiskt material som räcker till för att hålla aluminiumet bundet, men om det är brist på detta och aluminiumet inte binds kan växters rötter skadas (Department of primary industries and regional development 2018). Aluminium hämmar rötternas tillväxt och stör också andra funktioner hos växten som respiration och DNA-syntes samt begränsar växtens upptag av kalcium, fosfor och vatten. När mark försuras ökar tungmetallers löslighet. Om en mark har ett pH under 5 bildas ett överskott av ämnet mangan som sätter sig i vävnaden hos växten och gör att metabolismen påverkas negativt (Mani 2014).

Växters rötter kan rent generellt inte växa effektivt igenom jorden om den är sur vilket gör att den sura jorden blir som en vägg för rötterna. Om rötterna inte kan växa ordentligt begränsar det växtens tillgång på vatten (Department of primary industries and regional development 2018).

Kvävet har en gödslande effekt utöver att det kan bidra till försurning. Det gör att vissa växters sammansättning kan förändras på grund av den effekten. En del växter kan också gynnas mer än andra av detta. Snabbt växande växter drar nytta av den gödslande effekten medan mer långsamt växande arter riskerar att konkurreras ut (Länsstyrelsen i Stockholms län 2005).

Tungmetallernas löslighet ökar med minskat pH men för de viktiga näringsämnen, som växter tar upp, minskar istället lösligheten. Det är inte bara lösligheten som minskar, frigörelsen av växtnäring från organiskt material gör detsamma. Allt detta leder tillsammans till en minskad växtproduktion (Nilsson 2017).

3.8.2 Effekter på marken och marklevande djur

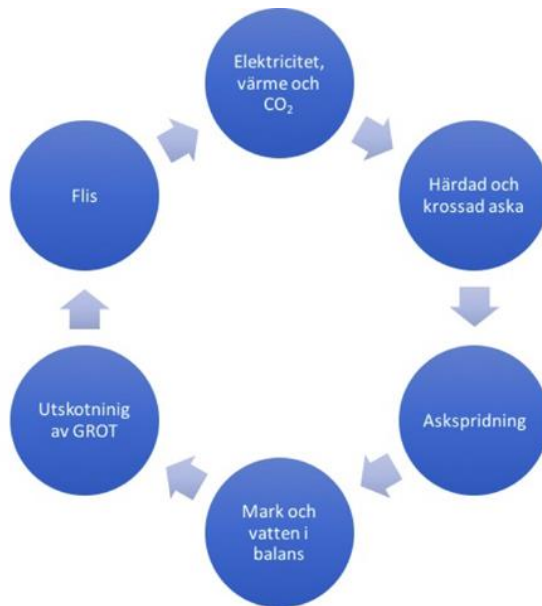
Många av de marklevande djuren, bakterier och även växter är anpassade genom evolutionen till en viss surhet i marken och därför kan försurningen av marken leda till att flera av dessa växtarter, bakterier och marklevandedjurarter försvinner eller utrotas. Det kan istället tillkomma nya arter till markområdet men trots det kommer artrikedomen rent allmänt i området att minska vid sjunkande pH (Naturvårdsverket 2017b). Skalbildande organismer, särskilt de med kalkskal visar tydligast negativa effekter vid försurning. De har svårt att bilda skal, t.ex. snäckor (Naturvårdsverket 2003).

En ökad löslighet hos tungmetallerna i marken, på grund av försurning, påverkar inte bara växter utan även djur. Nedbrytare, fåglar och däggdjur kan ta skada, vilket bidrar indirekt till att nedbrytningen av organiskt material minskar (Naturvårdsverket 2003).

3.8.3 Åtgärda genom askåterföring

När ett träd får stå orört från att det sås till att det dör och förmultnar ingår det i en viktig balans i naturen. Under ett trädets livstid tar det bland annat upp näringsämnen i form av baskatjoner från marken och sedan frigör trädet vätejoner som i sin tur försurar marken runt om. Denna balans återställs när träd dör och förmultnar, men detta gäller bara om trädet lämnas ifred och inte ingår i ett skogsbruk. Om trädet istället huggs ner och avlägsnas från platsen återställs inte balansen som den skulle gjort när trädet förmultnade. Försurningen, som blir effekten av detta, ökar ju mer biomassa som utvinns. Extra stor effekt blir det om man även tar ut GROT vid skogsbruket, dvs. "grenar och toppar". GROT är de mest näringsrika delarna på ett träd. GROT uttaget har ökat, vilket beror på att efterfrågan på biobränslen har ökat i Sverige de senaste åren. I vissa områden med hög kvävehalt kan det vara positivt att utvinna GROT då det försurande kvävet minskas. Problemet blir att de viktiga baskatjonerna behöver vara kvar då de fungerar som viktiga näringsämnen och minskar försurningen. Det är här askåterföring är en bra metod att åtgärda obalansen (Akselsson 2013). Genom att använda askåterföring bildas det återigen ett kretslopp som kan hjälpa till med att bibehålla den viktiga balansen mellan baskatjoner, näringsämnen och vätejoner i marken (Akselsson 2013). Aska är den fasta formen av rester efter förbränning. I och med att efterfrågan på biobränslen ökat

har också mängden aska ökat som restprodukt. Trots potentialen med askåterföring ses mycket av den producerade askan idag som en restprodukt som inte används. Om all aska istället skulle återföras tillbaka till skogen, sluts kretsloppet och försurningen av marken skulle minska, se Figur 15. Detta skulle leda till att två problem med den ökande användningen av biobränsle till stor del elimineras (Karlton *et al.* 2008): 1) Näringsämnen återförs till skogen, 2) Askan tas om hand och återanvänds istället för att läggas på deponi.



Figur 15. Visar det slutna kretslopp som askåterföring bidrar till (Emilsson 2006)

3.8.3.1 Lämpliga askor

Aska delas upp i olika kategorier. Huvudkategorierna är förbränning av förnybart och icke förnybart bränsle. Dessa huvudkategorier delas sedan in i allt mindre kategorier som är mer specifika. De askor som är mest lämpliga för askspridning är skogsbränsleaskor. De är främst lämpliga eftersom de uppfyller huvudsyftet med att sluta kretsloppet men också för att innehållet av giftiga ämnen och tungmetaller generellt är lågt i skogsbränsleaskor. I vissa fall kan blandaskor som innehåller aska från andra kategorier användas men det är endast aktuellt om blandaskan ligger under Skogsstyrelsens uppsatta gränsvärden för skadliga ämnen. Kraven på spridningsaskor är inte bara ursprungsbaserade utan även fokuserade på den kemiska sammansättningen. Askorna måste ha en viss halt av näringsämnen för att få användas. Om halterna av näringsämnen ligger under gränserna kan det åtgärdas med att blanda med andra askor eller tillsätta mineralnäring. (Emilsson 2006)

3.8.3.2 Stabilisering av aska

Innan skogsbränsleaskan är behandlad är den mycket reaktiv, har mycket oxider, hög salthalt och ett högt pH. För att undvika att dessa egenskaper, som skulle skada växter och marklevande djur, stabiliseras askan. Stabiliseringen är uppdelad i två delar, en kemisk och en fysisk. I den kemiska omvandlas oxiderna till karbona-

ter vilket gör att askan blir mindre reaktiv. Den fysiska delen är härdning, som innebär att askan klumpas ihop. Metoden som används i de flesta fall och är mest beprövad är självhärdning. Askan blöts och blandas i en blandare innan den läggs på hög för att torka. När askan är torkad krossas den. (Emilsson 2006)

3.8.3.3 Några risker med askåterföring

I Sverige finns det många förhållningsregler och enligt svensk lag måste all typ av planerad askåterföring anmälas till Skogsstyrelsen. Det är för att minska de kända riskerna med askåterföring. Om inte reglerna följs kan det få förödande konsekvenser. Andelen tungmetaller som återfinns i askorna innan spridning får inte överstiga de halter som fanns i området från början när det skördades och exporterades skogsprodukter. Vissa gånger är halterna av tungmetaller i askan dock så höga att det blir svårt att åtgärda till en rimlig kostnad. En sak som också kan vara problematiskt är att bestämma hur höga halterna av zink ska tillåtas. Växterna behöver zink som är ett växtnäringsämne, men inte i för höga halter. För mycket zink blir istället giftigt för såväl växter som marklevande djur (Emilsson 2006).

Oförbränt material i askan kan också leda till problem. Om det återfinns för höga halter ex. oförbränt kol i askan kommer den att härda sämre vilket i sin tur gör att askan kommer anses som för reaktiv för att spridas. Om inte detta skulle upptäckas kommer askan vid spridning att ge brännskador på vegetationen. Mindre lämplig aska är också den från träd i områden som drabbades av mycket radioaktivt nedfall efter Tjernobyli-olyckan då det kan finnas höga halter av radioaktivt cesium (Strålsäkerhetsmyndigheten 2018).

3.9 Effekter av försurning i sjöar och vattendrag

Eftersom pH-värdet kan variera mycket mellan olika sjöar och vattendrag är det viktigt att veta det naturliga tillståndet i varje vatten för att kunna bedöma om ett inlandsvatten blivit försurat. De första biologiska skadorna kan redan påträffas vid ett pH strax under 6. När pH-värdet börjar sjunka ner mot 5 kan generellt sett ingen annan fiskart överleva utom ålen (Göta älvs vattenvårdsförbund 2016). Försurningen har slagit ut stora delar av fiskfaunan i många sjöar och vattendrag i Sverige, särskilt i de sydvästra delarna av landet. Sjöar och vattendrag med fiskpopulationer som man försöker skydda eller återställa kalkas så att effekten av försurning minskar.

3.9.1 Normalt pH i olika typer av sjöar och vattendrag

I Sverige finns det i generellt sätt två olika typer av sjöar och vattendrag om man ser till normala pH-värden. Områden med mer kalkrik berggrund kan ha pH-värden strax över 8, medan de i mer näringsfattiga skogssjöar ofta naturligt har pH runt 6 (Göta älvs vattenvårdsförbund 2016). Det är alltså en skillnad mot i haven där pH nästan alltid ligger stabilt runt 8, se detaljer i avsnitt 2.10.

3.9.2 Försurningseffekter på djurlivet i sjöar och vattendrag

Försurning skadar djurlivet och har gjort det i tiotusentals kilometers vattendrag och tusentals sjöar i Sverige. Känsliga arter av fisk, som gädda och mört, tar stor skada av låga pH-värden. Den största fysiologiska effekten av försurning på djurlivet är påverkan på salt- och vattenbalansen (osmoregleringen). Av de djur som lever i sötvatten sker det ständigt en reglering av joner och vatten, som till exempel natrium och klorid. Dessa djur har ett aktivt upptag av joner, då sötvattnet de lever i har en mycket lägre koncentration av salter (joner) än deras inre koncentration. Detta kräver energi och med ett minskat pH-värde ökar förlusten av joner med en försämrad upptagningsförmåga (Nordwall 2018a).

Fiskens rom kan också ta skada. Det varierar mellan arter hur väl fiskrommen kan utvecklas i surt vatten. Om vattnet blir för surt inaktiveras ett enzym i rommen som har till uppgift att bryta ner äggskalet. Resultatet blir att rommen inte kläcks (Nordwall 2018a).

En annan effekt av försurningen är att aluminium frigörs i marken och transporteras ut i vattnet i form av aluminiumjoner. Aluminiumjonerna klistras sedan fast mot fiskens gälar i form av olika aluminiumkomplex, oftast hydroxider, vilket beror på att gälytan är basisk. Detta kan ses som en omvänd process i jämförelse med när aluminiumet löses i vattnet, vilket togs upp i sektion 3.7.5. När detta sker blockeras syreupptagningen och som skydd produceras slem som minskar syreupptagningen ytterligare. Gälarnas cellmembran kan också skadas av aluminiumet, vilket medför en ökad förlust av joner. I normalfallet drabbas fisken av båda dessa processer, vilket leder till både förlust av salter och syrebrist.

Det har uppskattats att omkring 7 000 till 9 000 sjöar i Sverige har förlorat mer än 20 % av sina djurarter på grund av försurningen. Lax och mört är ytterst känsliga för surare vatten, samt förhöjda halter av aluminium. Redan vid väldigt låga aluminiumhalter påverkas laxen negativt. Mörten har försvunnit helt i flera områden där pH-värdena har blivit lägre än vanligt (Nordwall 2018b).

De bottenlevande djuren i sjöar och vattendrag tar också skada av sänkt pH. I flera vattendrag med ordentligt låga pH-värden har de bottenlevande arternas bestånd sjunkit med två tredjedelar (Nordwall 2018a).

Arter som flodpärlmussla och flodkräfta är exempel på arter som tidigt påverkas vid en sänkning av pH. Flodpärlmusslan kan användas som en bra indikator om det är försurning i vattnet den lever i pga. av dess beroende av fisk i sin levnadscykel. Detta förklaras mer ingående i kapitel 6.4.4. Även olika sorters larver och juveniler (ungstadiet) är extra känsliga för låga pH-värden i vatten (Nordwall 2018a).

3.9.3 Hur görs försurningsbedömning av inlandsvatten?

Havs- och vattenmyndigheten har satt upp riktlinjer för hur en försurningsbedömning skall göras. pH-mätningarna som skall göras i området behöver tas flera gånger under en längre period i samma sjö eller vattendrag. Dessa nya prover

måste sedan sättas i jämförelse med äldre data så att man ska kunna avgöra om vattnet är försurat. Ett verktyg man använder sig av är det sk. MAGIC-biblioteket. MAGIC står för Model of Acidification of Groundwaters In Catchments. Detta bibliotek bygger på att man har lyckats bevisa att närliggande sjöar, som har liknande grundförhållanden, är lika försurningsdrabbade. Genom MAGIC-biblioteket kan man ta reda på vilket pH-värdet en sjö hade innan försurningen. Man använder 0,2 pH-enheter som gränsvärde. Har pH-värdet sänkts mer är 0,2 jämfört med det förindustriella anses sjön försurad (Svenska miljöinstitutet 2015). Biblioteket bygger på att man känner till vissa sjöars historiska pH-värden och kan använda dessa för att modellera det för sjöar utan denna kunskap men med kunskap om nutida kemi, hydrologi och storlek. Kunskapen om historiska pH-värden har man fått t.ex. genom att använda kiselalger från sjöns historiska sediment på botten som pH-indikator eller genom kunskap om vilka känsliga fiskarter t.ex. mört som funnits i ett vatten tidigare.

3.9.4 Åtgärda genom kalkning: fördelar och nackdelar

Sedan slutet av 1970-talet har kalkning av sjöar och vattendrag bedrivits och finansieras av statliga bidrag. Det har totalt satsas över fem miljarder kronor på projektet, vilket gör kalkningen till en av de största miljöåtgärderna som någonsin har genomförts i Sveriges historia (Havs- och vattenmyndigheten 2014). Kalkning medför en ökning i pH vilket gör att försurningskänsliga arter kan reproducera sig igen i de försurade sjöarna och vattendragen. De arter som har kort generationstid kan snabbt få tillbaka sitt populationstillstånd. Där det tidigare varit helt utdött av vissa bestånd, kan arter med stark spridningsförmåga återkolonisera områdena (Havs- och vattenmyndigheten 2014).

Det tar dock, för de flesta arter, längre tid än så. I genomsnitt tar det ungefär 20 år, från det att man börjar kalka vattnet, innan hela djursamhället fullständigt har återhämtat sig. Det kan ta ännu längre för fiskbeståndet. Till exempel har mört svårt att återhämta sig i en kalkad sjö, på grund av vandringshinder (Havs- och vattenmyndigheten 2014). I en studie av SLU har man undersökt vad 35 års kalkning kan ha för effekter på fisk i sjöar samt strömbiotoper i vattendrag. Rapporten kunde visa att kalkningen medförde höjning av reproduktion och ökad förekomst av bland annat abborre, gädda, lax och mört (Havs- och vattenmyndigheten 2014).

Kalkning av sjöar och vattendrag har genom åren inte uppvisat någon direkt skadlighet för den kemiska vattenbalansen (Wällstedt 2010). Det har dock kommit fram att flera av de svenska sjöarna kalkas i onödan. Av de 3 000 sjöar som årligen kalkas är det endast 900 som faktiskt behöver kalkas. Detta är dels ett ekonomiskt slöseri då det rör sig om stora statliga bidrag för kalkning i Sverige. Men det kan också resultera i att omgivande vegetation runt sjön kan ta skada om kalkmjölet blåser in mot land. Detta på grund av att den omgivande våtmarken får en snabb förändring i pH och därmed kan ta skada. Numera anpassas kalkningen till de lägre halterna av försurande ämnen. Men eftersom buffertförmågan har minskat i kringliggande mark är det alltid en risk att avsluta kalkning utan att riskera djurbestånden i vattnen. Försurningseffekten kan riskera att återkomma pga. av den minskade

buffertförmågan (Larsson 2012). Vissa vatten i sydvästra Sverige behöver kalkas många år framöver då berggrunden är svårvittrad och inte kommer att fylla på förrådet av buffrande baskatjoner inom överskådlig tid. Kalkningen är alltså en åtgärd för att mildra effekter av försurning. Åtgärden tar inte bort försurningen.

3.10 Koppling till svenska och globala mål

3.10.1 Svenska miljömålen

Fyra av de svenska miljömålen kopplar tydligt till detta kapitel. Det svenska miljömålet ”**Bara naturlig försurning**” berör alla sätt som Sveriges mark och vatten kan drabbas av försurning på. Målet definieras enligt Sveriges Riksdag; ”De försurnande effekterna av nedfall och markanvändning ska underskrida gränsen för vad mark och vatten tål...” Detta innebär att målet jobbar för att undvika all sort av försurning som den mänskliga faktorn bidrar med eller åtminstone minska effekterna så att det inte överskrider gränsen för vad mark och vatten tål naturligt (Naturvårdsverket 2017a).

”**Levande sjöar och vattendrag**” är ett svenskt miljömål som värnar om sjöar och vattendrag. Det definieras enligt Sveriges Riksdag; ”Sjöar och vattendrag ska vara ekologiskt hållbara och deras variationsrika livsmiljöer ska bevaras” Det är kopplat till försurning av sjöar och vattendrag då det har negativa effekter på livet som nämns i avsnitt 3.9.2. Det leder till en ohållbar miljö för hela ekosystemet. Detta mål omfattar dock flera miljöproblem än de från försurning (Miljömål 2016b).

Miljömålet ”**Levande skogar**” kan också kopplas till detta kapitel då det bland annat fokuserar på den biologiska mångfalden, livsmiljöer och att bibehålla en biologisk produktion. Som det nämns i avsnitt 3.8 kan försurning ge effekter på växter och marken som detta mål finns till för att motverka (Miljömål 2016c).

På liknande sätt Som det nämns i avsnitt 3.8 kan försurning ha negativa effekter på marklevande djur och i vissa fall leda till att de försvinner eller utrotas. Det är något som målet ”**Ett rikt växt- och djurliv**” finns till för att undvika. Målet jobbar för att Sverige ska ha ett fortsatt rikt växt- och djurliv och en naturmiljö som gynnar biologisk mångfald (Miljömål 2016a).

3.10.2 FN:s globala mål

De globala målen liknar de svenska miljömålen på flera punkter, och försurning från förbränning berörs i flera av målen. Ett av de viktigare delmålen för det här avsnittet är **mål 7 Hållbar energi för alla** (UNDP uå), eftersom fossila bränslen står för cirka 80 % av världens totala energianvändning i dagsläget. Ett av de viktigare ämnena att minska är koldioxid och andra växthusgaser för att minska klimatförändringarna, men som nämnts tidigare får man även svavelutsläpp vid förbränning av fossila bränslen. Delmålen nämner att man vill öka andelen förnybar energi i världens energimix, och fördubbla den globala förbättringstakten när det kommer till energieffektivisering. Ett annat delmål är att framställa en mer avancerad och

renare teknik för förbränning av fossila bränslen. Det skulle leda till minskade svavelutsläpp, vilket i sin tur leder till minskad försurning.

I **mål 15 Ekosystem och biologisk mångfald** (UNDP uå) kan kopplingar ses med de svenska miljömålen som berör “Ett rikt djur- och växtliv”, “Levande skogar” samt “Levande sjöar och vattendrag”. Det nämns här att den biologiska mångfalden är essentiell för jordens livsuppehållande system, och därmed avgörande för både nuvarande och framtida välfärd. Att använda naturresurser och andra ekosystemtjänster måste därför göras på ett hållbart sätt. Som nämnt tidigare i kapitlet skadar försurning både ekosystemen och den biologiska mångfalden och blir därför en viktig utmaning för att kunna uppnå det här målet.

3.11 Instuderingsfrågor

- Vad heter de två buffrings- och neutraliseringsreaktionerna för svaveldeposition som nämns i arbetet? Beskriv processen kortfattat.
- Nämn två effekter av försurning på marken.
- Hur kan man åtgärda problem med markförsurning som beror på för stort skogsuttag?
- Vid vilket pH sker de första biologiska skadorna i en försurad sjö eller vattendrag?
- Ge två exempel på vilka effekterna blir på djurlivet i en försurad sjö eller vattendrag samt exempel på djur som tar skada av försurning.
- Nämn en fördel och en nackdel med kalkning
- Nämn två naturliga försurningsprocesser och beskriv dessa kortfattat.
- Vad var anledningen för att våtdepositionen av såväl svavel som kväve i den engelska staden Rothamsted gick tillbaka efter 1980?

4 Förbränning och problem kopplade till aerosoler och organiska miljöföroreningar

I detta kapitel tar vi upp förbränningsrelaterade problem kopplade till aerosoler. Vi går igenom viktiga processer inom meteorologin som förklarar hur aerosoler sprids för att visa att det är möjligt att planera placering av verksamheter för att minska särskilt hälsoeffekter av aerosoler. Kopplat till det tar vi upp sopförbränning och vedeldning. Den relativt nya metoden, hydraulisk spräckning, att utvinna naturgas beskrivs också. Därefter går vi in på organiska miljöföroreningar som kopplas till olika typer av energianvändning och -produktion och de effekter de har i miljön där vi avslutar med effekter av oljeutsläpp i vattenmiljön.

4.1 Aerosoler

Aerosoler är en blandning av finfördelade fasta eller flytande partiklar i gas (vanligen luft). Aerosolen innefattar både gasen och partiklarna. Här fokuserar vi på partiklar som kommer från förbränning. Aerosolpartiklar ligger inom storleksintervallet 1 nm till 100 μm i diameter (Nationalencyklopedin uå).

Aerosoler kan ha hälsofarliga effekter därför är det viktigt att minska halterna av dem i tätbefolkade områden de kan även påverka klimatet

4.1.1 Aerosolers kemiska sammansättning

Partiklarna innehåller flera olika kemiska ämnen och för att få reda på den exakta sammansättningen måste analyser utföras. Den kemiska sammansättningen varierar och beror på vad aerosolen härstammar från.

Sot är en vanlig beståndsdel i aerosoler och bildas huvudsakligen då bränsle, både fossilt och biobränsle, förbränns ofullständigt. Sot har en värmande effekt i atmosfären och den svärta snö vilket gör att mer solljus absorberas (SMHI 2011). Sotpartiklar har kort livslängd i atmosfären vilket gör att utsläppsminskningar ger snabba positiva effekter på klimat och hälsa (SMHI 2011). Den största källan i Sverige till sotutsläpp 2020 är vedeldning, som står för ungefär en tredjedel av utsläppen. Utsläppen av sot har minskat med 64 % sedan 2000 pga. övergång till fjärrvärme, värmepumpar, att gamla vedpannor med höga utsläpp fasas ut samt att avgasrening från tung trafik har blivit bättre (Naturvårdsverket 2020a).

4.1.2 Partiklar – $\text{PM}_{2,5}$ och PM_{10}

Partiklar är den typ av föroreningar som orsakar störst hälsoproblem i tätorter. $\text{PM}_{2,5}$ är ett samlingsnamn för massan av alla partiklar vars diameter understiger 2,5 μm . PM_{10} är samlingsnamnet för massan av allpartiklar vars diameter understiger 10 μm . $\text{PM}_{2,5}$ ingår alltså i PM_{10} . $\text{PM}_{2,5}$ kommer huvudsakligen från förbränning och genom att gaser från förbränning kondenserar (Naturvårdsverket 2020b). I

Sverige kommer den största delen av $PM_{2,5}$ hit genom långdistanstranport och halterna är därför högst i södra Sverige (Naturvårdsverket uåc). Partiklarna uppstår även från vägtrafiken då däck, vägbana och bromsar slits, de bidrar mest till PM_{10} (Naturvårdsverket 2020b).

Att koncentrationen av dessa partiklar är starkt beroende av antropogena källor gick tydligt att se under Covid19-pandemin då längre utgångsförbud i flera länder ledde till att luftföroreningar från både fabriker och vägtrafik minskade kraftigt. Som exempel minskade $PM_{2,5}$ med 9-60 % i städer med befolkning större än en miljon i t.ex. Indien, Kina och Afrika (Benchrif *et al.* 2021). I denna studie undersöktes inte långdistanstransporten eller hur meteorologin påverkade halterna. Rapporter om klar luft och möjlighet att se omkringliggande berg rapporterades i media från flera städer.

4.1.3 Hälsoeffekter

Ju mindre en partikel är desto längre in i lungorna kan den nå. Därför orsakar små partiklar $PM_{2,5}$ större hälsoproblem än grövre PM_{10} . Genom inandning transporteras de in i kroppen och påverkar både andningsorganen och hjärtkärlsystemen. Akuta effekter är hosta, astmaattacker och kroniskt obstruktiv lungsjukdom (KOL). Nedsatt lungfunktion kan också ses hos barn som bor i områden med höga $PM_{2,5}$ -halter. (Naturvårdsverket 2020b). Känsligast för luftföroreningar är barn, framförallt för att deras lungor är mindre och inte fullt utvecklade, vilket leder till att den relativa mängden luftföroreningar de utsätts för är större än hos vuxna människor. Att barns immunförsvar inte heller är fullt utvecklat är också en bidragande faktor till varför de drabbas värst av föroreningar i luften.

Eftersom luftföroreningar från förbränning även brukar innehålla kväve- och svaveloxider, och ämnen som bildar marknära ozon som är aggressiva kemiskt leder det till direkta skador på de celler som kommer i kontakt med. Beräkningar från Naturvårdsverket och IVL har uppskattat att årligen drygt 7600 människor dör i förtid i Sverige på grund av luftföroreningar. Luftföroreningar i kategorierna $PM_{2,5}$, PM_{10} och kvävedioxid är skadligast (Gustafsson *et al.* 2010).

4.1.4 Miljökvalitetsnormer

Miljökvalitetsnormernas uppgift är att ge gränsvärden för luftföroreningar, som partiklar, kvävedioxid, svaveldioxid, kolmonoxid med flera. Svenska miljökvalitetsnormer har utformats efter luftkvalitetsdirektivens målvärden (*EU:s luftkvalitetsdirektiv* 2015). Dessa normer finns till för att garantera en god luftkvalitet. Deras uppgift är således att främja arbetet för att förebygga och minska sannolikheten för de skadliga effekter dålig luftkvalitet kan ha på både människor och miljön i större skala än för ett enskilt land. För oss i Sverige är det bra då vi är nettoimportör av luftföroreningar. De utsläpp av $PM_{2,5}$ till luften som vi själva producerar inom landets gränser är mindre än de som kommer till oss från andra länder (Naturvårdsverket uåa)

Det är osäkert om miljö kvalitetsnormerna påskyndat arbetet för att sänka mängden luftföroreningar i Sverige: Flera av direktivets mål har varit svåra att nå och nivåerna för vissa luftföroreningar ligger fortfarande övertillåtna gränsvärden. Likväl har koncentrationen och mängden utsläpp minskat de senaste tio åren. PM₁₀ är svårast att få bukt med. I städer är PM₁₀-koncentrationen är huvudsakligen kopplad till fordonsflottan och dess slitagedelar och dubbdäckens slitage av vägbanan. Däremot har dubbdäck förbjudits på vissa utsatta ställen i städer, vilket haft en positiv påverkan på partikelkoncentrationen i luften. (Gipperth *et al.* 2008).

4.1.5 Klimateffekter

Aerosoler i atmosfären påverkar strålbalansen, det vill säga balansen mellan in- och utstrålning. En stor del av dessa partiklar resulterar i en avkylande effekt på klimatet. Däremot är växthusgasernas uppvärmande effekt betydligt större än aerosolernas kylande effekter. De partiklar som står för den största avkylande effekten är sulfatpartiklar, de reflekterar kortvågig strålning tillbaka ut i rymden. Ett undantag är sotpartiklar som istället bidrar till uppvärmningen. Anledningen till detta är att den svarta färgen gör att de absorberar solstrålning effektivt. Större mängd absorberad strålning resulterar i ökad temperatur. Sot- och kolpartiklar är dock förhållandevis kortlivade i atmosfären (Swietlicki 2013).

Aerosoler påverkar också möjligheterna till molnbildning i atmosfären. Att detta är relevant grundar sig i att molnen också kan agera kylande i atmosfären. Moln som bildas i luft med mycket föroreningar (framförallt sulfatföroreningar) får ofta en ljusare färg och består av fler ”molndroppar”, vilket resulterar i att de reflekterar mer solstrålning än om molnet hade bildats i en ren miljö (Swietlicki 2013).

Utsläpp av flyktiga organiska ämnen, vanligen från lösningsmedel, industriprocesser, transport, jordbruk som reagerar med solljus och kväveoxid kan bilda marknära ozon. Detta ozon är relativt långlivat och stora mängder kan transporteras till Sverige från Europa. I Sverige är ofta halterna i städer är lägre än på landsbygden eftersom kväveföreningarna i avgaser bryter ner ozonet. Växtlivet är väldigt känsligt för marknära ozon och kan skadas redan vid naturligt förekommande koncentrationer. Det marknära ozonet hindrar växtens förmåga att ta upp koldioxid ur luften, så mycket som upp till 10 %. Detta hindrar fotosyntesen, vilket är en livsviktig process dels för växten och indirekt för alla levande organismer på jorden. Om fotosyntesen inte kan fortlöpa minskas upptaget av koldioxid vilket i sin tur leder till att växthuseffekter påskyndas då inte lika mycket kol kan bindas in i växterna. Att det marknära ozonet hindrar växters upptag av koldioxid i luften har en negativ klimatpåverkan (Naturvårdsverket uåb). Ozonet är även en växthusgas.

4.2 Hur meteorologin påverkar luftföroreningar

Meteorologin påverkar luftföroreningars spridning, transport, transformering och deposition. Det tas upp i detta avsnitt från källa till sänka.

4.2.1 Fem viktiga fenomen inom meteorologin som påverkar luftföroreningars effekter

Advektion är den process som transporterar utsläppen/luftföroreningen bort från källan, horisontell förflyttelse av luft (Johansson & Mårtensson 2015b).

Det finns inom flödesmekanik flera processer som styr transporter dock står endast advektion för transport av volymer (Nationalencyklopedin uå).

Diffusion är förloppet som beskriver utbredningen av ett ämne. Flera ämnen kan diffundera vilket innebär att de blandas (Nationalencyklopedin uå). Diffusion skapas genom turbulens i atmosfären. Diffusion medför att partiklar sprider sig vertikalt mot flödet. Partiklar som sprider sig vertikalt mot flödet stiger antingen upp mot gränsskiktet eller ned mot markytan. (Johansson & Mårtensson 2015b)

Turbulens är ett kaotiskt tillstånd av ett flöde. Det innebär en oregelbundet i flödet samt stor virvelintensitet. Motsatsen till turbulens är *stabilt flöde* (Nationalencyklopedin uå). De finns två typer av turbulens, termisk alstrad turbulens (instabila förhållanden) samt mekanisk alstrad turbulens (stor vindgradient). (Johansson & Mårtensson 2015a)

Torrdeposition är partikelnedfall med inverkan från gravitation. Även partikelnedfall på vattenytan anses vara torrdeposition. (Nationalencyklopedin uå).

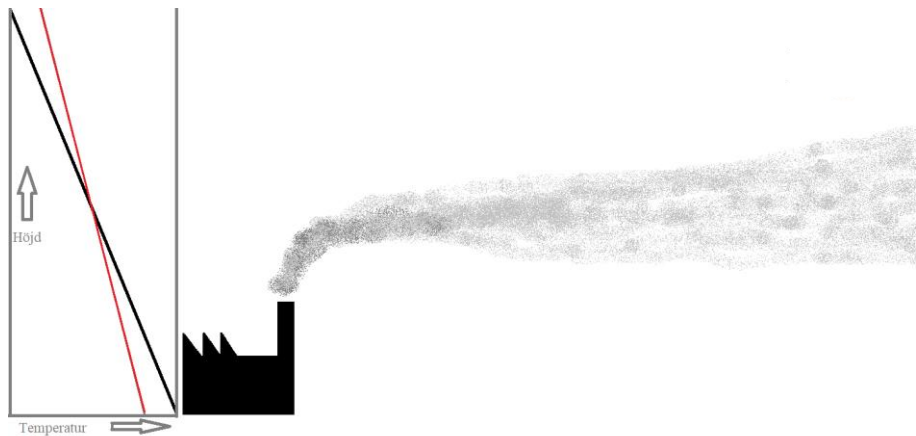
Våtdeposition (vått nedfall) är nedfall av partiklar som löst sig med vatten i atmosfären (moln). Nedfallet når jordytan i form av nederbörd (Nationalencyklopedin uå).

4.2.2 Processer inblandade vid spridning av luftförorening

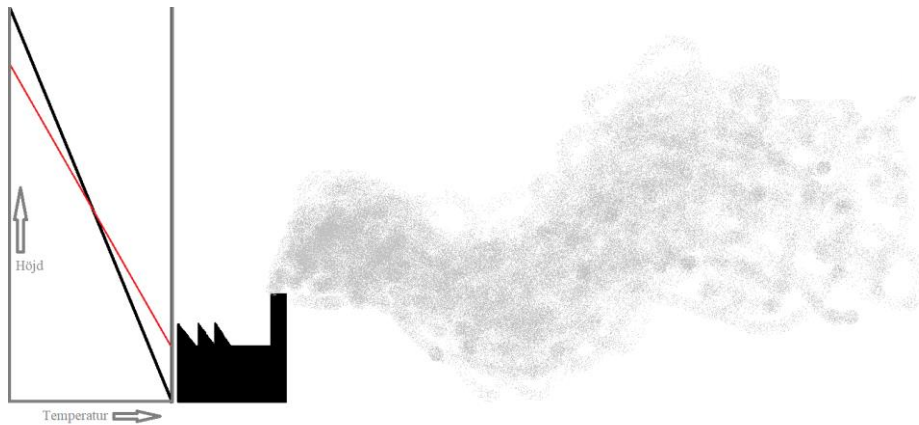
Gränsskiktet är det område i atmosfären som har koppling till jordytan. Denna del av atmosfären har en strömning som ofta domineras av turbulens, medan atmosfärsskikt över gränsskiktet domineras av laminär strömning. Tjockleken på gränsskiktet kan variera från ett tiotal meter upp till 1–2 km. (Johansson & Mårtensson 2015a) Gränsskiktet kan vara *instabilt*, *stabilt* eller *neutralt*. Dessa tre tillstånd har olika effekter på vertikala luft rörelser och beror på hur temperaturen varierar med höjden. Man kan approximera luften i gränsskiktet till flera små luftpaket, detta för att kunna förklara fenomen som uppstår inom gränsskiktet. Om dessa paket inte har några energiutbyten med varandra kan man se systemet som *adiabatiskt*. Detta är ett förenklat sett att beskriva hur vertikala förflyttningar av luftpaket uppstår. När ett luftpaket förflyttar sig upp eller ned i höjddled kommer trycket att förändras. Ett luftpaket som sjunker kommer utsättas för högre tryck och därmed höjs temperaturen i luftpaketet. Medan ett luftpaket som stiger kommer utsättas för lägre tryck vilket leder till att temperaturen sänks (Chow *et al.* 2013).

I torr luft kommer temperaturen att avta med cirka 1 °C per 100 m vilket kallas **det torradiabatiska temperaturavtagandet** (Johansson & Mårtensson 2015a). Det representeras med den svarta linjen i Figur 16 till Figur 20. Vid **neutral skiktning** avtar temperaturen i atmosfären med samma linjära samband som det torradiabatiska temperaturavtagandet. När ett luftpakets temperatur avtar långsammare med

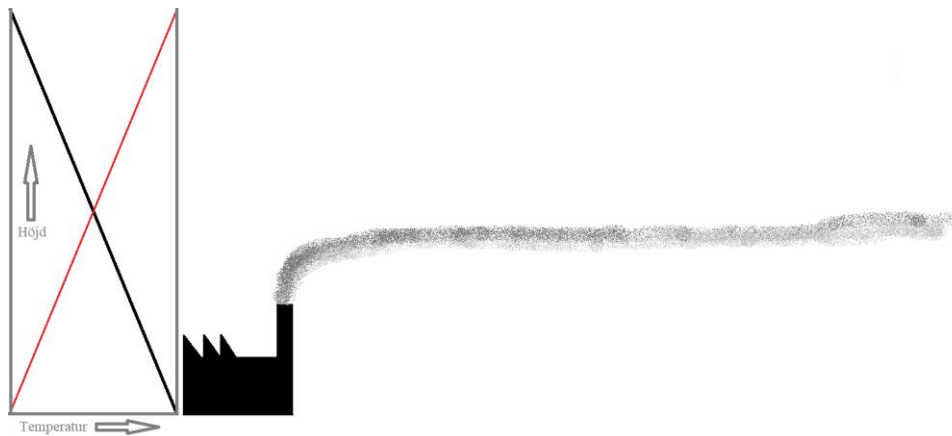
höjden än vid neutral skiktning har vi ett annat tillstånd som kallas **instabil skiktning** (Figur 17). Tillståndet kännetecknas av tydlig omblandning i gränsskiktet som resultat av främjad vertikalrörelse. Utifrån en startpunkt för ett luftpaket kommer den fortsätta i den riktning som den blir ”knuffad” mot. Exempel om luftpaketet ”knuffas” upp från sin startposition kommer den fortsätta att stiga upp då luftpaketet är varmare än sin omgivning. Vid instabil skiktning kan turbulensen bli kraftig, man brukar kalla denna typ av turbulens för termisk turbulens. Motsatsen till denna skiktning är **stabil skiktning** vilket i istället motarbetar vertikalrörelse. Här avtar istället luftpaketets temperatur snabbare än omgivningen. Detta gör att ett luftpaket som knuffas i någon riktning ”strävar” efter att återgå till sin startposition. Till exempel är att luftpaketet knuffas upp som i förra fallet, nu är luftpaketets temperatur lägre än omgivningen vilket får den att sjunka nedåt. (Johansson & Mårtensson 2015a) En mycket kraftigt stabil skiktning kallas för **inversion**, vilket är ett tillstånd där vertikalrörelsen utsätts för kraftig inbromsning (Figur 18). Vid inversion är det mycket vanligt att smog bildas. Det uppstår när inversion har varit långvarig över en större stad. Eftersom vertikalrörelse av luftpaket hämmas då temperaturen i detta område ökar med höjden stängs utsläpp från industrier, fordon mm inne nära marken under inversions-skiktet vilket skapar en dimma full med ohälsosamma luftföroreningar (SMHI uåa).



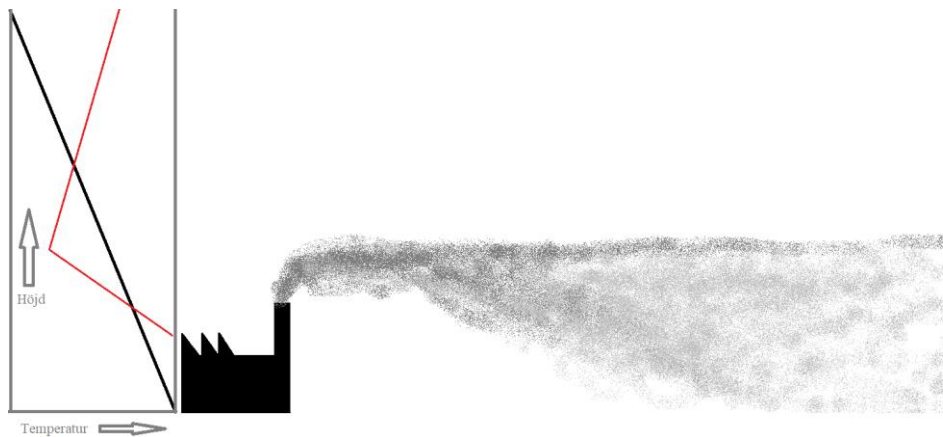
Figur 16. Den svarta linjen visar den adiabatiska temperaturminskningen medan den röda visar på hur den ”tillfälliga” temperaturminskningen är i atmosfären. Y-axeln visar höjden (m) och x-axeln temperatur (C°). Pilarna visar i vilken riktning höjden och temperaturen ökar längs x- och y-axeln. Hur spridningen av utsläpp från skorsten kan arta sig beror på skiktningen i gränsskiktet. Här har vi ett tillstånd som kallas coning från ”kona” då rökplymen får en konformad spridning. Denna form skapas när luften är neutralt eller svagt stabil. Rökplymen får en begränsad spridning vertikalt. Spridningen av röken ökar med avståndet från skorstenen.



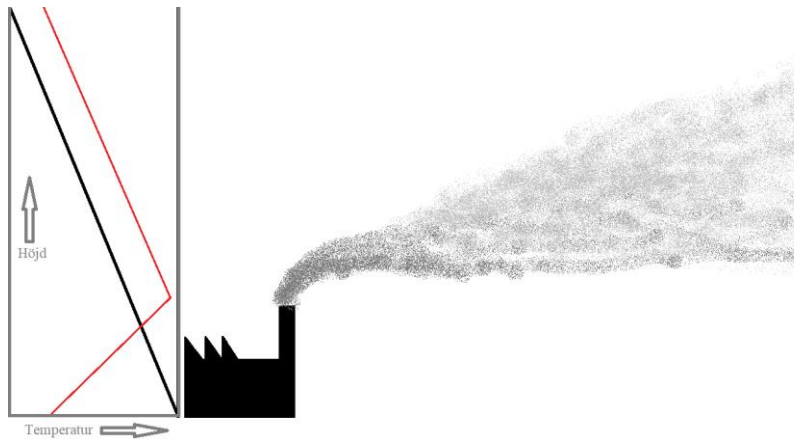
Figur 17. Här visas instabil skiktning vilket gör att röken sprids kraftigt i vertikal riktning både upp och ned. Det beror på att temperaturen minskar snabbare än den adiabatiska temperaturminskningen (Petersson 2008).



Figur 18. Vid extrem stabil skiktning som i denna figur kommer rökgasen att motverkas att spridas i vertikal riktning vilket ger låga halter av föroreningar i området närliggande skorstenen. När temperaturen inte avtar med höjden har vi en inversion vilket är kraftigt dämpande. (Petersson 2008)



Figur 19. Här är skorstenen mitt i inversionsskiktet vilket gör att utsläppen hålls under skiktet vilket gör att koncentrationen av föroreningar ökar nära marken. Höjden på skorstenen kommer ha betydelse då det kan uppstå inversion över en viss höjd.



Figur 20. Här är skorstenen precis ovanför inversionen inte har en dämpande effekt på utsläppsspridningen. Det gör att de kan fortsätta att spridas vertikalt upp. (Petersson 2008)

4.2.3 Sju exempel på hur kraftigt förorenad luft uppstår

1. **Många källor av föroreningar.** Många källor kommer resultera i mer utsläpp vilket kommer i sin tur att påverka luftkvalitén. Var källorna befinner sig (skorstenshöjd) kommer påverka hur långt partiklar sprids (späds ut) i området. (Johansson & Mårtensson 2015b)
2. **Stationärt högtryck+ subsidens.** Vid stationärt högtryck kan en kraftig subsidensinversion bildas då luft sjunker inom ett intensivt högtrycksområde. Luften värms då upp vilket gör att inversionen bildas. Subsidens står för nedåtriktad luftrörelse. (Laurin & Färnlöf 1994)
3. **Låg vindhastighet.** När medelvinden är låg transporteras inte utsläppen snabbt från källan. Detta innebär dålig spridning av utsläppen vilket ökar koncentrationen av föroreningar i närområdet. (Johansson & Mårtensson 2015b)
4. **Lågt gränsskikt.** Höjden på gränsskiktet kommer påverka då överliggande skikt agerar som lock vilket kommer stänga in utsläpp inom gränsskiktet. När gränsskiktet är lågt resulterar det i högre luftföroreningar nära markytan (Petäjä *et al.* 2016).
5. **Dalgång där föroreningar kan samlas.** Kall luft rinner ner i dalgången och skapar en kraftig stabil skiktning. Resultatet är föroreningar som stängs inne och lägger sig i botten på dalen. (Johansson & Mårtensson 2015b)
6. **Klart väder vilket ger stabil skiktning under natten.** Då stabil skiktning agerar dämpande gentemot vertikal rörelse av luften. Det gör att förorenad luft stannar längs med gränsskiktet. Då ökar koncentrationen av förorenad luft vid markytan.
7. **Solenergi för kemisk omvandling.** Genom samverkan från luftföroreningar som kväveoxider och flyktiga organiska ämnen med solenergi kan fotokemiska reaktioner uppstå. Ett exempel på detta är ozon som kan bildas nära markytan genom denna process. Ozon kan ge upphov till miljöproblem i form negativ inverka på grödor samt irritera slemhinnor hos människor (Naturvårdsverket uåc.).

4.3 Avfallsförbränning kräver rökgasrening

Avfallsförbränning innebär att avfall eldas och på det sättet återanvänds en del av energin i avfallet (Tabell 6). Avfallet eldas främst i två olika typer av anläggningar, kraftvärmeverk som producerar både el och värme, samt värmeverk där det enbart produceras värme. Ett kraftvärmeverk fungerar på så vis att de varma rökgaserna från förbränningen värmer upp vatten, som sedan bildar ånga. Denna ånga driver i sin tur en turbin som producerar el. Överskottsenergin av denna process skickas direkt ut på fjärrvärmenätverket. Däremot i ett värmeverk så skickas all energi ut på fjärrvärmenätverket (Sveriges avfallsportal uå).

Tabell 6. Fördelar och nackdelar med att förbränna avfall i kraftvärmeverk och värmeverk.

Fördelar	Nackdelar
Utnyttjar stor del av den energi som finns lagrad i avfallet	Risk att farligt avfall som batterier eller liknande förbränns.
Ersätter användandet av fossila bränslen för att skapa värme och elektricitet.	Viss del av det avfall som förbränns hade kunnat återvinnas istället.
Minskar deponering.	Orenat ger det utsläpp till luft i form av väteklorid, svavel och kväveoxider, dioxiner och partiklar.
Biprodukterna går att använda i andra delar av samhället.	Plast tillhör fossila bränslegruppen och den förbränns.
Effektivare reningssystem leder till minskade utsläpp.	
Går att göra en ekonomisk vinst på att förbränna avfall.	

Då man förbränner avfall frigörs flera miljöfarliga ämnen i rökgaser som väteklorid, svavel och kväveoxider, dioxiner och partiklar. För att bli av med delar av dessa miljöfarliga ämnen använder man sig av olika rökreningsystem. Dessa system kan i vissa fall motsvara hälften av den totala investeringskostnaden vid bygget av en ny anläggning. För att rena avgaserna kan använda sig av både våta och torra system (Sveriges avfallsportal uå). En fördel med att använda sig av våta system är att man kan utvinna ytterligare värme under reningssystemet genom rökgaskondensering. I det processvatten som används i våta system samlas de föroreningar som tidigare fanns i avfallet samt de föroreningar som bildats under förbränningen, detta vatten behöver därför renas (Sveriges avfallsportal uå). Efter förbränningen får man rester som slagg från ugnen och aska från rökgasreningen. Hela 15-25 volymprocent av avfallet blir kvar som bottenaska som sorteras och mognas till slaggrus (Laggren 2014).

För att minska mängden av farliga ämnen i avfall har EU avfallsdirektiv (Directive 2008/98/EC) och förespråkar först och främst att en produkt redan i tillverkningsstadiet ska vara miljövänlig och kretsloppsanpassad. I andra hand förespråkar strategin att produkten samt restprodukterna ska kunna materialåtervinnas. Förbränning av avfall ska ske då avfallet är sorterat och innehållet är dokumenterat, denna process ska även övervakas av kunnig personal och kontrolleras regelbundet med

provtagningar. Förbränning ska bara användas för att undvika deponering. För att minska mängden farliga utsläpp är det viktigt att veta vad för avfall det är man eldar. I dagsläget består vårt hushållsavfall av framförallt plast, papper och matavfall, hushållsavfallet motsvarar cirka 43 % av det totala avfall som eldas i Sverige, resten kommer från industrisektorn (Regeringen 2017). Det finns krav på den som förbränner avfall i förordning 2013:253 om förbränning av avfall. I den står det att man ska veta vad för typ av avfall det är som tas emot för förbränning. Man ska även veta om avfallet är lämpligt att förbränna i just den aktuella anläggningen.

Inom EU producerar varje invånare fem ton sopor varje år varav bara 38 % återvinns i vissa länder läggs över 60 % av hushållssoporna på soptippar. Sverige är idag det land i Europa som utvinner mest energi per ton avfall, men även andra europeiska länder bränner avfall. Sverige importerar avfall från vissa länder i synnerhet Norge (Regeringen 2017).

4.4 Vedeldning

Den småskaliga vedeldningen har genom tiderna varit en viktig del i Sveriges energiförsörjning och fyller även idag en stor roll i energiförsörjningen. År 2013 fanns det drygt 219 000 vedeldade pannor i småhus i Sverige. Statistik från boverket visar att den siffran minskar för varje år. Med pannor menas i detta fall fastbränsleutrustning med indirekt uppvärmning, exempelvis pannor eldade mot ackumulator-tank (Boverket 2016).

Antalet pelletseldade pannor år 2013 var omkring 132 000 stycken i bland småhusen i Sverige. Detta antal har legat relativt oförändrat de senaste fem åren. När det gäller rumsvärmare i småhus, exempelvis braskaminer och öppna spisar har antalet har ökat kraftigt de senaste åren, från 494 000 år 2009 till 648 000 år 2013 (Boverket 2016). Att elda med ved och pellets är ett klimatsmart småskaligt uppvärmningsalternativ förutsatt att det sker på rätt sätt. Vid dålig förbränning bildas oförbrända luftföroreningar med negativ påverkan på klimat och hälsa.

4.4.1 Ofullständig förbränning leder till miljö- och hälsoeffekter

En fullständig förbränning i småskaliga vedeldade anläggningar är mycket viktig för att minimera de utsläpp av vissa miljö- och hälsoskadliga luftföroreningar som uppkommer (Naturvårdsverket 2009). Hur man eldar sina pannor och vilket bränsle som används gör en stor skillnad i utsläppsmängderna. Mätningar visar att om pannor istället för braseldning, eldas med strypt luftdrag blir emissioner som partiklar, kolväten, kolmonoxid och kväveoxider mycket höga. Slutsatsen man kan dra av detta är att en av de mest effektiva åtgärderna för att minska emissionerna kan vara att informera om hur ved ska eldas (Persson & Win 2011).

Luftföroreningar från småskalig förbränning har en betydande hälsopåverkan och är ett problem i Europa. Den småskaliga förbränningen av bibränslen förväntas öka i framtiden som en följd av den rådande klimatpolitiken, vilket kommer leda

till en större mängd utsläpp av PM_{2,5} (Boverket 2016). Uppskattningsvis dör 61 000 människor i Europa varje på grund av småskalig förbränning av kol och biobränslen och i Sverige ligger motsvarande siffra på cirka 1000 dödsfall som en orsak av luftföroreningar från vedeldning.

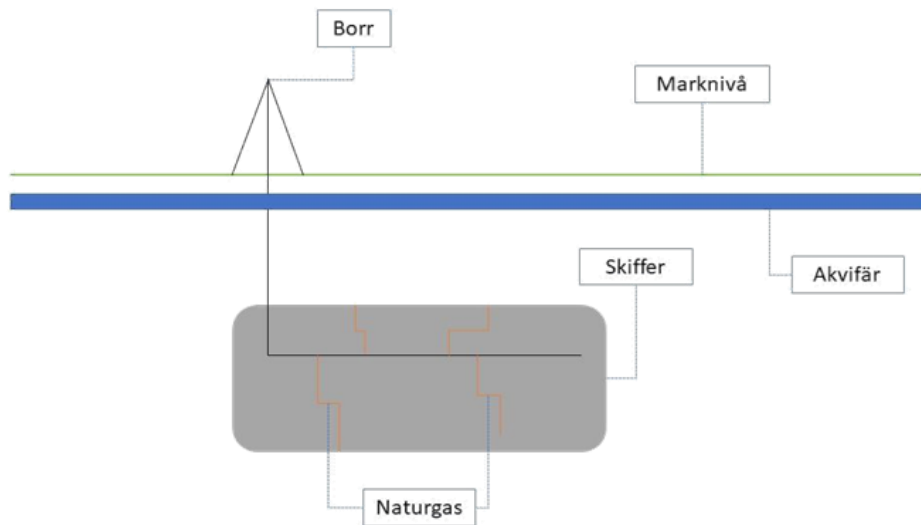
De luftföroreningar från småskalig förbränning som har störst hälsopåverkan är PM_{2,5}-partiklar, sot och bens(a)pyren. Den småskaliga förbränningen står för 28 % av Sveriges totala utsläpp av PM_{2,5} och till 99,5 % av dessa utsläpp kommer från förbränning av biobränslen (Boverket 2016).

4.4.2 Hårdare krav som åtgärd – vad innebär de?

År 2020 och år 2022 träder EU:s ekodesignreglering i kraft för fastbränslepannor och rumsvärmare. Regleringen innebär att produkter som inte uppfyller krav med avseende på energi och resurseffektivisering inte får säljas. År 2017 tog Boverket beslutet att införa nya regler för att uppfylla de krav som omfattas av EU:s ekodesignreglering. Från och med sommaren 2018 gäller boverkets nya regler. För fastbränslepannor införs mer skärpta krav på utsläpp av partiklar och kolmonoxid. För rumsvärmare innebär den nya regleringen en skärpning i kraven på utsläpp av kolmonoxid och på verkningsgrad (Boverket 2017).

4.5 Hydraulisk spräckning för att utvinna naturgas

Hydraulisk spräckning är en metod som används för att utvinna naturgas som lagrats i skiffer (se även avsnitt 2.1 för koppling till klimatpåverkan). Skiffer är en sedimentär bergart som är porös. Naturgasen är bunden i skiffret dels genom att det är instängt, men även genom att det är adsorberat i berggrunden. Vid hydraulisk spräckning används vatten som medium för att spräcka skiffret under högt tryck. När sprickorna har skapats kan naturgasen som är lagrad i skiffret börja ”läcka”. Gasen absorberas av vattnet och kan sedan utvinnas när vattnet kommer upp till ytan (SGU uå). Sand och flera kemikalier blandas ut i vattnet för att bryta skiffret effektivt. Kemikalierna används för att effektivisera tillförseln av naturgas genom spillvattnet. Sanden ser till att sprickorna som skapas hålls öppna, så att gasen effektivt kan sippra ut (Estrada & Bhamidimarri 2016). Detta kräver i sin tur stora mängder av vatten för att processen skall fungera. Det vatten som sedan kommer upp igen, spillvatten, kan i viss grad återanvändas för att återigen transportera naturgas upp till ytan. Det som inte kan återanvändas av spillvattnet hålls ut i urgrävda bassänger för att sedan skickas till rening. Brytningen har kommit i gång i större skala sedan en så kallad horisontell borrhörjat användas. Tekniken gör att man kan täcka upp en stor yta i berget trots att man borrar från endast en plats. Skiffret befinner sig på cirka 1000 meters djup, och vid rätt nivå, borrar man längs med skiffret (Estrada & Bhamidimarri 2016).



Figur 21. Beskrivande bild av hur hydraulisk spräckning går till.

I världen finns en stor potential till energi genom hydraulisk spräckning och utnyttjandet av naturgas från skiffer. Men många länder är skeptiska på grund av att utvinningsmetoden är ung, och har inte prövats i stor skala någonstans förutom i USA (Rönning 2014). Där startades utvinningen av naturgas från skiffer i början av 2000-talet. Utvinningen har gjort att USA blivit världens största naturgasproducent och priset på naturgas har sjunkit (Rönning 2014). I Sverige finns låg potential att utvinna naturgas i skiffer. Gasen totala energimängd är uppskattad till 2900 TWh (Nordling 2015). Men ingen utvinning har ännu påbörjats. Endast prospektering och upphandling av land har skett.

De potentiella skador som kan förekomma är föroreningar av grundvattnet genom läckage av naturgas från rören när gasen transporteras upp med vattnet. Metan som är en del av naturgas kan då spridas. Spår av höga halter metangas i dricksvatten har dokumenterats. Detta kan medföra en risk i och med att det är extremt brandfarligt (Vengosh *et al.* 2014). För att förhindra detta gjuts den del som är i kontakt med akvifären med ett flertal lager av armeringsjärn och betong (Estrada & Bhamidimarri 2016). Kemikalier som blandas ut i vattnet för extrahering av naturgasen kan i sin tur vara direkt skadliga för miljön om de kontaminerar jorden eller närliggande grundvattnet. Även andra lösta ämnen i skiffret kan vara skadligt, som tungmetaller och radioaktiva ämnen. Detta är i sin tur direkt kopplat till hur behandlingen av spillvattnet går till. Rapporter om dumpat spillvatten i närliggande floder har visat på förhöjda värden av dessa farliga ämnen (Vengosh *et al.* 2014).

Det krävs mer data och grundliga undersökningar för att göra en vetenskapligt grundad koppling mellan dessa potentiella miljöskador och hydraulisk spräckning för utvinning av naturgas. För att förebygga och undvika framtida problem, är ett alternativ att kartlägga akvifärer och geologiska profiler och ha data på deras sam-

mansättning så att man har innan-data. Då kan man identifiera eventuella förhöjningar av farliga ämnen (Vengosh *et al.* 2014). Metoder som exkluderar utblandning av kemikalier i vattnet som används vid hydraulisk spräckning har också prövats i Storbritannien vilket reducerar förekomsten av farliga ämnen i spillvattnet (Estrada & Bhamidimarri 2016).

4.6 Organiska miljöföroreningar

Organiska miljöföroreningar är många olika typer av föroreningar. Dessa föroreningar har hamnat i miljön från utsläpp vid produktion, användning av vissa produkter eller på grund av avfallet från produkter som innehåller kemikalier (Naturvårdsverket, 2017b). Majoriteten av organiska ämnen som släpps ut är lösningsmedel och utsläppen av dessa har ökat de senaste fem åren (Naturvårdsverket 2018). I detta avsnitt behandlas följande typer av föroreningar:

1. Flyktiga organiska föreningar, t.ex. petroleumkolväten (bensen, toluen, xylen)

2. Långlivade organiska föreningar (POPs – persistent organic pollutants), t.ex. dioxiner och polycykliska aromatiska kolväten (PAH). Långlivade organiska ämnen motstår nedbrytning. De är ofta hydrofoba (löses inte i vatten men i fett).

3. Cancerframkallande, mutagena (genotoxiska) och reproduktionstoxiska ämnen kallas CMR-ämnen. Dessa är inte giftiga direkt utan orsakar skador eller förgiftning under en lång tid vilket kan orsaka förändringar i arvs massa eller mutationer som kan ge upphov till cancer (Granström 2016).

Vissa ämnen anrikas i kroppen hos djur – olika begrepp

Bioackumulation används som begrepp för ämnen som är fettlösliga och samlas i fettvävnad hos organismer. Det blir en ökad koncentration av ämnet i kroppen. Detta gäller många långlivade organiska föroreningar samt vissa metaller som metylkvicksilver.

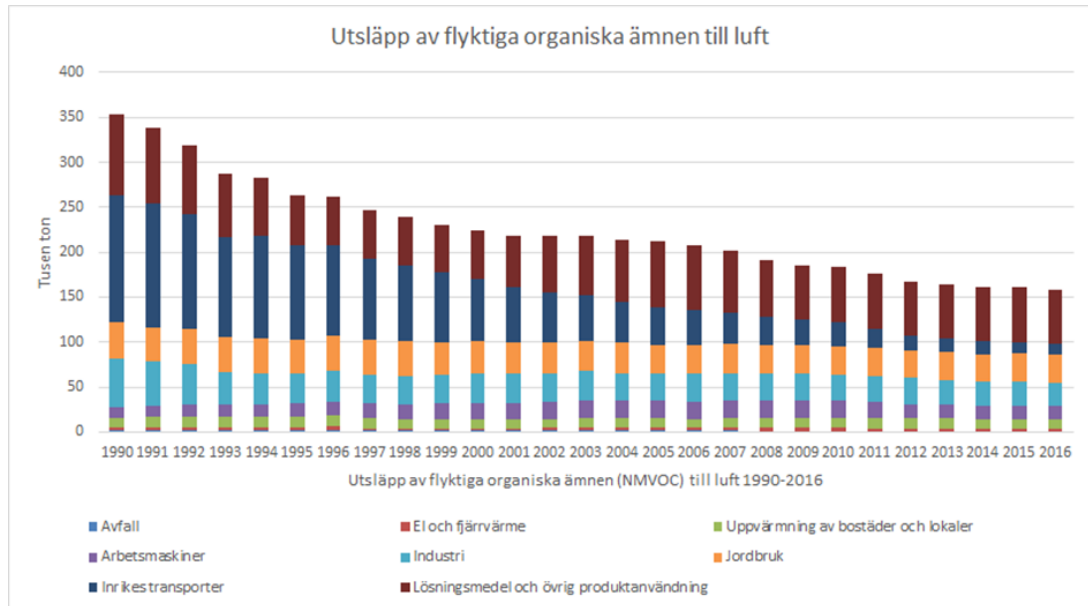
Ett ämne som lätt löses i fett och enkelt kan tas upp i kroppen hos organismer sägs ha hög **biotillgänglighet**.

Ett ämne som finns i större mängder högre upp i näringskedjan sägs ha **biomagnifikation**. Ett ämne kan både bioackumuleras och biomagnifieras.

Källa: Granström 2016

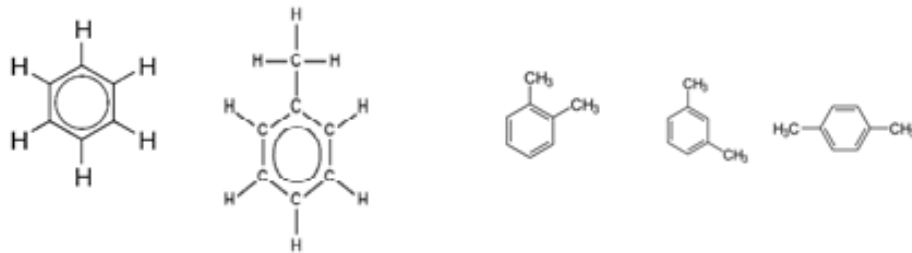
4.6.1 Flyktiga organiska ämnen

I Figur 22 visas utsläpp av flyktiga organiska ämnen till luft från olika sektorer, där man ser att lösningsmedel står för en stor del av utsläppen, men även transport, jordbruk och industri bidrar med en hel del utsläpp.



Figur 22. Utsläpp av flyktiga organiska ämnen till luft i Sverige. Källa: Naturvårdsverket 2017a.

4.6.1.1 Petroleumkolväten



Figur 23. Struktur för bensen, toluen och xylen (1,2-dimetylbensen, 1,3-dimetylbensen och 1,4-dimetylbensen).

Främsta utsläppskällan av **bensen** (Figur 23) är motortrafiken men ett visst utsläpp sker även från vedeldning, kemisk industri och fritidsbåtar. Väl i kroppen kan bensen orsaka blodcancer och anses vara mycket giftigt för människan. Halten av bensen har sjunkit sedan 1990-talet och tros fortsätta sjunka om än långsammare (SMHI 2014). Dock anses bensen snabbt brytas ned och ha låg potential för bioackumulering. Vid tester tog det endast 16 dagar att fullständigt bryta ner bensen (Blanck 2008).

Toluen (Figur 23) är ett aromatiskt kolväte, i ren form som en färglös vätska med lukt av petroleum. Det används främst som motorbränsle och är en av de största komponenterna i bensin där det ensamt står för ca 10–15% av innehållet. Toluen används också som lösningsmedel i färger och i lim. Den största utsläppskällan är

motortrafiken och utsläppen kan orsaka cancer och allergier hos människor (Utsläppsregistret uå). Toluen bryts ned snabbt i miljön och har en halveringstid i aerobt (syresatt) vatten på 4 dagar (Blanck 2008).

Bensin innehåller även ca 10 % **xyl**en som finns i tre isomerer (Figur 23):

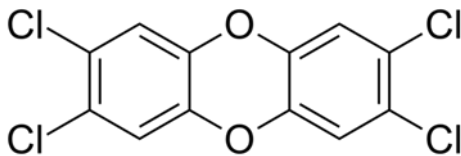
- 1,2-dimetylbensen
- 1,3-dimetylbensen
- 1,4-dimetylbensen

Xylen används i lim och färger där egenskaper som god lösande förmåga och snabb avdunstning är önskvärt. Främsta utsläppskällan är bensindriven motortrafik (Blanck 2008, Utsläppsregistret uå). Xylen klassas som hälsovådligt.

4.6.2 Långlivade organiska föreningar

4.6.2.1 Halogenerade aromatiska kolväten – dioxiner

Dioxiner bildas vid förbränning av klorhaltigt organiskt material, ved eller tillverkning av kemikalier (Granström, 2016) och är ett samlingsnamn för 210 olika föreningar. Till gruppen dioxiner räknas också polyklorerade dibensoparadioxiner (PCDD) och polyklorerade dibensofurander (PCDF). Flera av dioxinföreningarna anses vara mycket giftiga där 2,3,7,8-tetraklordibenso-p-dioxin (TCDD) (Figur 24) anses vara den mest toxiska (Persson 2017).



Figur 24. 2,3,7,8-tetraklordibenso-p-dioxin (TCDD) den giftigaste dioxinen

Dioxiner och dioxinliknande ämnen ansamlas i fett hos levande organismer där koncentrationen av ämnena ökar ju högre upp i näringskedjan man kommer. Via fisk, kött och mjölk exponeras vi för dessa ämnen där maten står för ca 90 % av det totala intaget. Den grupp som får i sig mest av ämnena per kilo kroppsvikt är ammande spädbarn då ämnena har ansamlats i moderns fett och vid amning utsöndras dessa till modersmjölken (Granström 2016). Halterna av dioxinlika ämnen har minskat i livsmedel sedan mätningarna startade 1999. Detta gäller också halterna i modersmjölken som har minskat sedan 1970-talet (Persson 2017).

Dioxiner påverkar hur nervsystemet och hjärnan utvecklas och höga halter av dioxiner kan ge beteendestörningar. Dioxiner misstänkts också störa immunförsvaret, hormonsystemet och fortplantning (Persson 2017, Granström, 2016). I riktigt höga doser kan dioxin även ge klorakne, en långvarig akneliknande hudinflammation i ansiktet.

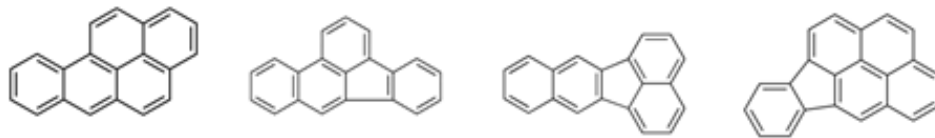
För att rangordna totaleffekten av dioxinlika ämnen används ett ekvivalensverktyg där ämnen uttrycks i toxinekvivalenter (TEQ). Alla ämnen tilldelas där en faktor, toxisk ekvivaleringsfaktor (TEF), som uttrycker dioxinlika ämnen var för sig som en kvot i förhållande till TCDD. En blandning av ämnen kan nu använda TEF för att räkna ut TEQ som motsvarar den koncentration av TCDD som skulle ge samma effektnivå (Persson 2017).

4.6.2.2 Polycykliska aromatiska kolväten (PAH)

PAH bildas vid ofullständig förbränning av ved eller avfall och de främsta utsläppen av PAH sker främst vid vedeldning för uppvärmning av hushåll (Naturvårdsverket 2018), men även till exempel från industrier och trafik där PAH kan spridas långt från utsläppskällan (Naturvårdsverket 2017b). Det finns olika PAH'er och många kan orsaka cancer. Av dessa finns det fyra (Figur 25) som anses mest farliga (Naturvårdsverket 2018):

- bens(a)pyren
- bens(b)fluoranten
- bens(k)fluoranten
- indeno(1,2,3-cd)pyren

Utsläppen av dessa PAH har minskat med ca 26 % i Sverige sedan 1990 även om en viss ökning har skett på senare år på grund av en ökad biomassaförbränning (Naturvårdsverket 2018).



Figur 25. Bens(a)pyren, bens(b)fluoranten, bens(k)fluoranten, indeno(1,2,3-cd)pyren

4.7 Oljeutsläpp i vatten

En vanlig källa till utsläpp av organiska ämnen är oljeutsläpp i vatten. Detta kan ske i samband med oljeborrning till havs eller vid båttransporter där fartyg rensar tankarna innan de ska ta emot ny olja som drivmedel till båten. Oljeutsläpp sker också vid fartygsolyckor särskilt om det är ett fartyg med huvudsaklig last av olja som förlit eller gått på grund. Oljeutsläpp i svenska havsområden är vanliga, 2011 skedde 300 oljeutsläpp där ca 10 % krävde bekämpningsinsatser. Den havsregion som är mest trafikerad i Sverige är Östersjön och med det följer stora miljörisiker. Mängden olja som släpps ut vid ett oljeutsläpp är inte direkt relaterad till skadornas omfattning. De faktorer som påverkar hur stora miljöeffekterna blir är:

- Hur mycket oljan spridits
- Vilken typ av olja det är, hur den rör sig och hur den bryts ned

- Var den läckt ut
- Hur stor yta av kust eller havsområde som är påverkat
- Hur känsligt området är. Hög känslighet om t.ex. sjöfågelkolonier
- Hur många habitattyper som påverkas samtidigt, som klippor, stränder, mangroveträsk och våtmarker
- Tidpunkt för läckage (fågelflyttning, häckningsperiod)
- Typ av olja: hur persistent och giftig den är
- Hur många arter det finns i utsläppsområdet

Ett litet oljeutsläpp kan åstadkomma större skada om det sker i en kritisk period än ett större utsläpp vid en annan del av året. Oljeutsläpp kan sprida sig flera tusen meter i bredd och djup om inte direkta åtgärder görs. Effekterna av oljeutsläpp är ofta allvarliga men inte långvariga. Mest långvariga blir effekterna på djupa bottnar där nedbrytningen sker i frånvaro av syre (Nationalencyklopedin uå).

4.7.1 Effekter på djur som kommer i kontakt med olja

Känsliga djur förgiftas eller dör och djur som är mindre känsliga för oljeutsläppen drabbas då deras föda skadats av oljan. De toxiska ämnen som påverkar skaldjur och fiskar mest är aromatiska ämnen med en eller fler bensenringar.

Skador på sjöfåglar som kommit i kontakt med oljeutsläpp är en av de mest kända oljeskadorna. Om en mindre sjöfågel kommer i kontakt med olja räcker det med en oljefläck på 2–3 cm² för att förstöra fjäderdräktens förmåga att avvisa vatten och att värmeisolera, vilket kan leda till att fågeln drunknar eller dör av nedkylning. Större sjöfåglar som blivit måttligt nedsmutsade kan svälta ihjäl då de spenderat för mycket tid på land för att inte frysa. Sjöfåglar utan vattenavvisande fjäderdräkt blir tunga och får svårigheter att flyga och simma.

För alla djur är ångorna giftiga att inandas – centrala nervsystemet, lever och lungor påverkas. Djur som försöker göra sig rena från oljan gör det ofta med munnen vilket leder till att de får olja i magen vilket leder till skador på inre organ. Det blir ofta reproduktionsskador både direkta när olja går igenom äggskal och dödar foster och indirekta via skador på reproduktionsorgan.

4.7.2 Nedbrytningstid vid oljeutsläpp

Nedbrytningstiden beror vilket typ av utsläpp som har skett. Nedbrytningen kan variera från ett par dagar till många år beroende på vilken oljetyp, oljemängd, strandtyp, årstid och klimat samt biologiska faktorer (MSB 2019). Generellt sett går återhämtning snabbare i varma områden och vid klippkuster och långsamt i kallt klimat, i träskområden och i djupt liggande områden. Olja bryts ner av solljus, bakterier, svampar och andra mikrober.

4.7.3 Oljesaneringsmetoder

De olika saneringsmetoder som används beror på vilken typ av utsläpp som ska åtgärdas. Tunna och delvis flyktiga produkter, som bensin, kräver till exempel andra

metoder än tjock trögflytande olja. Sanering av olja är en tidskrävande process som kräver stora operationer. Konsekvensen av sanering och bekämpning av oljeutsläpp utgör även stora kostnader (Nationalencyklopedin uå).

Vid sanering av oljeutsläpp är den första åtgärden att försöka begränsa oljans utbredning genom att placera ut länsar (flytande väggar) i vattnet och på land (MSB 2010). Olika typer av absorberingsmedel placeras sedan där oljeutsläppet har förekommit så att medlet kan dra åt sig oljan för att underlätta separationen mellan oljan och vattnet eller land. Allt från enkla handredskap till specialkonstruerade båtar och fordon samlar sedan upp så mycket fri olja som möjligt. Material som blivit påverkat av olja samlas in och bearbetas med oljelösande eller oljeemulgerande medel, ofta i kombination med vatten eller ångstrålar. Oljan som avlägsnats från de kontaminerade materialen är svår att samla upp för vidare användning. Beroende på vilket sorts oljeutsläpp som har skett kan oljenedbrytande mikroorganismer spridas ut över oljeskadade områden för att påskynda den biologiska nedbrytningen.

Magnetiska nanokompositer har möjlighet att avlägsna vattenföroreningar så som olja, färgämnen och organiska lösningsmedel. Fördelen med att använda magnetiska nanokompositer är att det är lätt att separera dem från vattnet med hjälp av magneter som drar åt sig de oljeabsorberade nanokompositerna (Shariatdoost *et al.* 2018).

4.8 Koppling till svenska och globala mål

4.8.1 Svenska miljömålen

Tre mål har tydlig koppling till vad som tas upp i detta kapitel:

Frisk luft - Luften ska vara så ren att människors hälsa samt djur, växter och kulturvärden inte skadas.

God bebyggd miljö - Städer, tätorter och annan bebyggd miljö ska utgöra en god och hälsosam livsmiljö samt medverka till en god regional och global miljö. Natur- och kulturvärden ska tas till vara och utvecklas. Byggnader och anläggningar ska lokaliseras och utformas på ett miljöanpassat sätt och så att en långsiktigt god hushållning med mark, vatten och andra resurser främjas.

Giftfri miljö - Förekomsten av ämnen i miljön som har skapats i eller utvunnits av samhället ska inte hota människors hälsa eller den biologiska mångfalden. Halterna av naturfrämmande ämnen är nära noll och deras påverkan på människors hälsa och ekosystemen är försumbar. Halterna av naturligt förekommande ämnen är nära bakgrunds nivåerna.

4.8.2 FN:s globala mål

Gällande Agenda 2030:s koppling till aerosoler och andra luftburna partiklar som kan vara skadliga för levande organismer så finns det en tydlig koppling till **mål 3. Hälsa och välbefinnande**. En av målsättningarna lyder: ”Därtill är bästa möjliga

hälsa, inklusive nödvändig hälso- och sjukvård, mat, vatten, ren luft, sanitet, hygien och läkemedel, grundläggande rättigheter” vilket kopplar till just aerosoler och hur de kan påverka individens hälsa (Regeringskansliet uå). Det finns även en stark koppling till **mål 13, bekämpa klimatförändringen** eftersom aerosoler inkluderar partiklar som är klimatpåverkande och i vissa fall är skadliga för växter. Aerosoler som är skadliga för växter begränsar fotosyntesen vilket leder till att växthuseffekten ökar när inlagringen av kol minskar (Regeringskansliet uå). Eftersom koncentrationen av aerosoler är kopplade till urbana miljöer och hur förbränningsmotorer används är även miljömål 11 relevant. **Mål 11 är hållbara städer och samhällen**. Detta mål talar om hur det skall finnas hållbara städer ur bland annat ekologiskt- och folkhälsoperspektiv, vilket är de perspektiv som är kopplade till just aerosoler och hur de påverkar ekosystemet och individens hälsa (Regeringskansliet uå).

Mål 6 som berör att **säkerställa rent vatten och sanitet** och **mål 14 om att bevara hav och marina resurser** kan kopplas till hydraulisk spräckning, i och med att det finns potential att förorena vatten. Dessa två mål är även relevanta för oljeutsläpp och andra organiska miljögifter som förorenar vatten.

Delmål 11.6 lyder: ”Till 2030 minska städernas negativa miljöpåverkan per person, bland annat genom att ägna särskild uppmärksamhet åt luftkvaliteten samt hantering av kommunalt och annat avfall” (Regeringskansliet uå). I och med detta mål är det relevant att ha en förståelse för hur vädret påverkar spridning av luftföroreningar i gränsskiktet och kan ha en stor effekt på städernas luftkvalité. Genom att analysera vanligt förekommande väderfenomen som spridning och skiktning, kan man planlägga tung industri med höga utsläpp till platser där de kommer ha minst negativa inverkan på luftkvaliteten.

4.9 Instuderingsfrågor

- Att det finns partiklar i luften som kan vara skadliga för både människan och naturen är ingen nyhet, men vilka sorters partiklar finns det och vilka skadliga effekter kan de ha?
- Namnge två partiklar som kan vara skadliga för människan och förklara vilka hälsoeffekter dessa kan ha
- Nämn två partiklar som har en negativ effekt på miljön och förklara hur dessa kan vara skadliga.
- Vilka potentiella miljöskador kan hydraulisk spräckning föra med sig?
- Nämn tre exempel på hur kraftig förorenad luft uppstår.
- Nämn två fördelar och två nackdelar med avfallsförbränning.
- Vad innebär det att ett POP bioackumulerar?
- Vilka organiska ämnen är mest toxiska för fisk och skaldjur vid ett oljeutsläpp?
- Nämn fem orsaker som påverkar hur stora effekterna av oljeutsläpp blir

5 Biobränslen – med fokus på övergödning och ozon

5.1 Olika typer av biobränslen

Biobränslen delas in i olika kategorier beroende på var de kommer ifrån. Den första kategorin kallas *första generationen* och innefattar växter och grödor som används till biodrivmedel men också är ätbara av människan. Några exempel är: majs (till etanol) och raps (till diesel). Sedan finns *andra generationen* vilket består av skogsprodukter, och restprodukter från matproduktion. Dessa konkurrerar inte direkt med matproduktion. Några exempel på andra generationens biobränslen är halm (etanol) och lignin (diesel). Den sista är *tredje generationens* biobränslen vilka är helt oberoende från restprodukter och inte består av ätbara grödor. Till denna grupp räknas vätgas för bränsleceller som på sikt kan framställas från biobränslen. Ett exempel på en tredje generationens biobränsle är mikroalger. Den tredje generationens biobränslen konkurrerar varken med matproduktionen och är inte heller beroende av restprodukter av annan industri. (Skogsindustrierna 2007)

Idag produceras stor del av biobränslen från råvaror som människor annars kunnat äta. Majsgrödor är ett exempel på en råvara som ofta används i etanolproduktion. Av all producerad majs i världen 2011 användes 15 % till biobränslen (Hillestad & Hageberg 2013). Att sådan stor del av grödorna används till biobränslen är den stora problematiken i många länder. Att ta upp åkermark och inte använda den till matproduktion riskerar i längden till stigande matpriser och kan resultera i matbrist.

Andelen biodrivmedel har ökat i Sverige och 2016 var den 18,6% av marknaden (Svebio 2017). Av dessa var 85 % biodiesel, biogas 7,6 % och etanol 7,6 %.

Tabell 7. Typer av biobränslen och råvarutillgång i Sverige

Typ	Förklaring	Potential [TWh/år]
Trädbränslen	GROT träd m.m	87 (Hagström 2006)
Stråbränslen	halm, Salix, rörfen	27 (Hagström 2006)
Avfall	Brännbart avfall & biprodukter	77 (Hagström 2006)
Torv		1-5 (Svebio 2020)

5.1.1 Vanligaste biobränslet är skogsbränsle

Huvuddelen av det biobränsle vi använder i Sverige är fast bränsle från skogen (77 %). Det kan dels vara rester från avverkning, grenar och toppar (s.k. GROT) samt restprodukter som spån, bark och rivningsvirke. På andra plats kommer flytande biobränslen som både importeras och produceras i Sverige (16 %) och på sista plats kommer förnybara andelen i sopor (7 %). (Eurostat uå)

5.1.2 Torv – fossilt eller förnybart?

Torvmarker bildas när sjöar och våtmarker växer igen eller genom försumpning av fastmark. En torvmark delas in i två huvudsakliga kategorier mosse och kärr. En mosse är en typ av torvmark som endast får vatten från nederbörd. Då nederbörden inte tillför några nya näringsämnen till mossen och avrinningen från torvmarken läkar ur näringsämnen gör det att en mosse alltid är näringsfattig. Ett kärr däremot får vattentillförsel från omkringliggande marken. Det gör att kärr kan vara olika näringsrika beroende på hur mycket näring som tillförs från vattnet (Jordbruksverket 2014). En naturlig torvmark är syrefattig vilket gör att den består av ofullständig nedbruten biomassa. Denna biomassa (torv) kan användas för energiutvinning genom förbränning. För att utvinna torv dikas först marken ut. Sedan låter man vattnet rinna av vilket sedan gör det möjligt att användas i förbränningsugnar för att utvinna energi.

Problematiken med torv är dock debatten om det ska räknas som ett fossilt bränsle eller inte. Torv återbildas mycket snabbare än kol och olja men tillväxten är fortfarande mycket långsam och är cirka 1 mm/år (Schoning 2014). Mängden växthusgas som släpps ut genom förbränning av torvmarker varierar beroende på vilken torvmark torven tas från. Olika torvmarker släpper naturligt ut olika mängder metangas, lustgas och koldioxid. Så i vissa fall kan utvinning av torv ha en minskad effekt av växthusgasemissioner. Mycket beror på hur utvinningen av torvmarken ser ut samt efterarbetet. Effekten på växthusbalansen är mycket komplex. Vilket även syns i Sveriges elcertifikatsystem där det räknas som en förnybar råvara medan det enligt EU, FN och Naturvårdsverket räknas som en fossil råvara (Naturvårdsverket 2017).

5.1.3 Etanol

Grunden för att framställa etanol (C_2H_5OH) utgörs av råvaror som innehåller någon form av kolhydrater; som cellulosa, stärkelse och socker. Etanolens tillverkningsprocess delas in i tre moment: förbehandling, fermentation och efterbehandling. Under förbehandlingen mals råvaran ned till mindre beståndsdelar och blandas med vatten och enzymer, där enzymerna bryter ned råvaran till glukos (försockring). Efter att den försockrade sörjan kylts till minst $35^{\circ}C$ kan jäst adderas och fermentationen påbörjas. I en nästan helt anaerob process fermenterar jästen glukos till etanol och koldioxid i ungefär lika stor kvantitet, samt små mängder andra organiska föreningar. Jästen begränsas av sin tålighet mot alkohol och fermenteringen slutar därför när alkoholhalten nått ca. 15 %. Vid efterbehandlingen separeras etanolen från sörjan genom en energikrävande destillation och dehydratisering vilket ger upp till 99 % etanol. Slutligen denatureras etanolen genom tillsättning av bensin. Hur mycket energi som fås ut av tillverkningsprocessen i jämförelse med den energi processen kräver beror på val av process och råvara. Beroende på hur och vilka restprodukter som tillvaratas så kan denna siffra förändras (Hill *et al.* 2006). Den vanliga jästsvampen *Saccharomyces cerevisiae* används till fermentation av 1:a generationens etanol men kan inte fullständigt fermentera sockret från 2:a generationens förbehandlingsprocess. Då används en genmodifierad *S. cerevisiae* (Haas

& Bratt 2010) vilket i dagsläget inte är kommersiellt gångbart, bland annat på grund av de inhibitorer som bildas under 2:a generationens förbehandling (Passoth 2014).

5.1.4 Biogas

Biogas produceras genom bearbetning av diverse biologiska material som mat/hushållsavfall, växtdelar, gödsel, eller slam från reningsverk i syrefri (anaerob) miljö och kan därefter användas i motorer för att producera el eller värme. Denna bearbetning görs av bakterier som bryter ner materialet och processen sker också naturligt t.ex. i våmmen på kor eller i sumpmarker. Biogas består till största del av metan (CH_4) och koldioxid (CO_2), men även mindre mängder av andra ämnen som vätgas (H_2), svavelväte (H_2S) och kvävgas (N_2). Biogasframställning ske främst på tre sätt.

Deponigas bildas på soptippar (avfallsdeponier) som täcks för att skapa en så syrefri miljö som möjligt och gasen samlas upp med hjälp av vertikala brunnar som borrats ner i avfallet.

Rötgas skapas i rötkammare på biogasanläggningar där temperaturen och trycket anpassas efter substratet (mixen av olika organiska material) för att skapa optimala förutsättningar för produktionen. Substratet pumpas in i den lufttäta kammaren, bryts ner och därefter töms kammaren på vatten, föroreningar och rötresten (som kan användas som gödsel pga. högt näringsinnehåll). Gasen måste även "uppgraderas" för att höja energiinnehållet vilket innebär att en del av koldioxiden avlägsnas. I rötkammaren klyvs komplext material (proteiner, polysackarider och lipider) till mono- och oligomerer (aminosyror, socker, peptider och fettsyror) med hjälp av extracellulära enzymer genom hydrolys. I nästa steg fermenteras dessa ämnen, vilket innebär en ofullständig oxidation av organiska föreningar i syrefri miljö, och s.k. intermediära produkter (alkoholer, fettsyror, mjölksyror, osv) bildas. Därefter sker oxidation och själva metanogenesen, dvs. metanproduktion. Med hjälp av flera typer av mikroorganismer som oftast är beroende av varandra. Dessa organismer är väldigt känsliga och hela processen kan stoppas av temperatursvängningar, överbelastning, hämmande ämnen eller dålig substratblandning.

Termisk förgasning är en process som går ut på att skogsavfall förgasas (reagerar med kontrollerad mängd syre/vattenånga) under högt tryck och temperatur och gasen som utvinns kan via metanisering omvandlas till biogas. Processen är visserligen väldigt energikrävande men gasen som produceras kan transporteras och sedan användas där efterfrågan finns.

5.1.5 Biodiesel

Biodiesel (även kallad FAME, fettsyrametylestrar) används för att driva bilar, lastbilar, bussar eller andra fordon med dieselmotorer. RME, rapsmetylester, är ett exempel på FAME. Biodiesel har liknande egenskaper som vanlig diesel men biodiesel är framställd genom omförestring av växt/animaliska oljor (som t.ex. rapsolja,

palmolja eller majsolja), och är alltså inte fossilt. Dessa oljor tillhör den första generationen bibränslen och konkurrerar alltså med matproduktion. Ett sätt att lösa detta problem är att återvinna matlagningsolja som använts av restauranger för att tillverka drivmedel som då kallas "andra generationens biodiesel". I sin naturliga form är biodiesel obrukbar under i kallt väder då oljorna och fetterna endast är flytande i plusgrader.

En annan produkt som är tillgänglig på marknaden är HVO (hydrerade vegetabiliska oljor) som framställs genom en annan process, nämligen hydrogenering av triglycerider (istället för förestring). Detta innebär att dubbelbindningar och syre tas bort från triglyceriderna och slutprodukten är förnybar diesel med samma kemiska sammansättning som hos vanlig fossil diesel. Denna biodiesel fungerar bättre i kyla än FAME.

Produktionen av biodiesel är relativt dyr vilket också innebär högre pris. Tidigare har detta delvis kompenseras med försäljning av glycerol, som är en biprodukt vid framställningen (ca 100kg glycerol/ton biodiesel) men den globala ökningen av biodieselproduktionen har orsakat prisfall på marknaden för råglycerol.

5.1.6 Andra energigrödor

Energigrödor, som olika gräsarter eller örtväxter kan odlas på åkermark och användas i ovan nämnda bibränsleproduktioner eller eldas upp i värmeverk. Samma gäller halm, spannmål och vallväxter. Ett annat alternativ är att plantera energiskog dvs. snabbväxande träd. I Sverige oftast träd av släktet *Salix*. Träden skördas efter 3-5 år när de har blivit 5-7 m höga.

5.1.7 Biobränslen som växer i vatten

Alger kanske inte är det första man tänker på när det talas om biobränslen. Alger som växer direkt i haven är svårskördade men faktum är att alger har en stor potential för att producera biobränslen. Alger har många fördelar över första generationens energigrödor. De har hög energidensitet per hektar, vilket betyder att man kan ta upp mindre markytor för att producera samma mängd biobränsle. Algerna som används är genmodifierade för sitt syfte. Algerna växer i stora bassänger på land. De växer på samma sätt som växter, genom att ta koldioxid från luften och tillsammans med solljus och vatten producerar algerna oljor/socker som sedan kan utvinnas. Utvinningen sker genom att först ta upp algerna. Sedan torkas de innan de bryts ned med hjälp av lösningsmedel eller ljudvågor. Ut från algerna kommer då oljan/sockret som sedan kan skickas iväg för till raffinaderi för att producera önskad produkt. I dagsläget finns det inga kommersiella fabriker för storskalig produktion av biobränslen från alger. Det krävs fortfarande forskning för att optimera algerna för kommersiellt bruk.

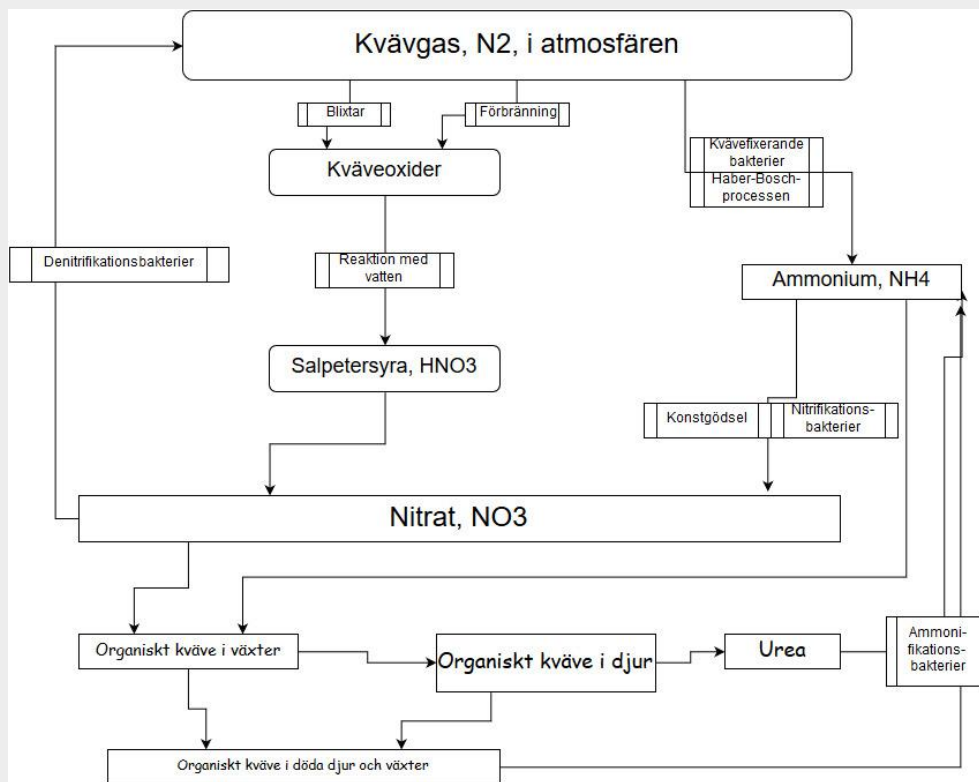
Ett sätt som visat sig kunna bli intressant för framtiden är att använda avloppsvatten och rökgaser från industrier som vatten för algerna att växa i. Då avloppsvatten är mycket näringsrik och rökgaser innehåller mycket koldioxid kan dessa användas

för att öka algernas produktion. Rökgaser kan även ha en värmande effekt på vatt-
net vilket ytterligare ökar effektiviteten hos algerna vintertid (Miljönytta 2016).

5.2 Kväveutsläpp kopplade till biobränslen

Kvävets kretslopp

En stor del av kvävet kretslopp är naturlig. Människan påverkar genom att öka
förbränningsrelaterade utsläpp av kväveoxider samt genom att använda konst-
gödsel, d.v.s. konstgjord kvävefixering, i en process som kallas Haber-Bosch me-
toden. Konstgödsel används vid matproduktion men även för att öka på produkti-
onen av vissa biobränslen.



5.2.1 Utsläpp av kväveoxider är ett problem vid förbränning – biobränslen är inget undantag

Idag siktar våra miljö- och klimatmål mot att få ner koldioxidutsläppen genom att
fasa ut de fossila bränslena och ersätta dessa med förnybara. Detta innebär dock
inte per automatik att vi kommer att överge förbränningsprocessen - energi från
förnybara källor tillgodogörs även den till viss del från förbränning, där biodiesel
kan vara ett exempel (Lindström *et al.* 2017). När syre och kväve reagerar tillsam-
mans vid höga temperaturer, typiskt vid förbränning, så bildas kväveoxider, NO_x,

som är ett samlingsnamn för kväveoxid, NO, och kvävedioxid, NO₂ (Palash *et al.* 2013). Om vi tar exemplet med diesel, så kommer dessa gaser att bildas oavsett om förbränningen sker med fossilt diesel eller biodiesel. Ibland kan till och med halterna av NO_x vara högre för biodieseln än för den fossila dieseln på grund av högre syrehalt i biobränslet (Lindström *et al.* 2017). Effekterna sett till koldioxidutsläpp är således väldigt positiva när förbränningen sker med förnybart istället för fossilt, men för NO_x är det alltså ingen skillnad, eller i vissa fall sämre.

I Sverige står transportsektorn och industrin för mer än hälften av NO_x-utsläppen (Naturvårdsverket 2017a). Dessa utsläpp avgår till luften, för att därefter falla till marken eller förorena luften. När kväveoxiderna faller till marken bidrar de till försurning (som behandlas utförligt i kapitel 3) och övergödning av mark och sjöar. Ett tydligt exempel på när detta lett till övergödning är Östersjön, där nästan en miljon ton kväve tillförs varje år från avrinningsområden runt om Östersjön, till följd av bland annat NO_x-utsläpp. Detta hotar den biologiska mångfalden, där många djur- och växtarter har svårt att anpassa sig till den snabba förändringen och bara ett fåtal arter till slut kommer att finnas kvar (WWF 2018).

5.2.2 Åtgärder i kraftvärmeverk för att minska NO_x

Ett typiskt exempel på NO_x-utsläpp som sker vid förbränning är från kraftvärmeverk. Utsläppshalterna på flera faktorer, som förbränningsmetod, anläggningens utformning, reningsmetod och halten kväve i det använda bränslet. Tabell 8 visar NO_x-utsläppen för de vanligaste bränslena i kraftvärmeverk i Sverige.

Tabell 8. Utsläpp av kväveoxider för olika typer av bränslen Källa: Naturvårdsverket 2005.

	Biobränslen	Torv	Naturgas	Kol	Olja
Kväveoxider (mg/MJ)	40-110	40-110	30-70	50-110	50-150

År 1992 infördes kväveoxidavgiften i syfte att minska kväveoxidutsläppen för förbränningsanläggningar som producerar mer än 25 GWh per år, vilket har lett till att utsläppshalterna minskat drastiskt (Naturvårdsverket 2017c). För att begränsa utsläppen ytterligare kan anläggningar bli miljöcertifierade enligt olika standarder. Ett exempel på detta är Tekniska Verken i Linköping, som är certifierade enligt ISO 14001. På anläggningen i Linköping använder man sig till exempel av urea-injicering som omvandlar kväveoxider till kvävgas och vatten. Ett annat sätt att minska utsläppen är genom återföring av rökgas från förbränningen till pannan.

5.2.3 Vid odling av biobränslen läcker kväve till vatten

Vatten som används vid odling av grödor för biobränslen, kontamineras med organiskt material och gödningsmedel från gödsling, vilket ger en övergödande effekt ifall vattnet inte renas innan det släpps ut. Detta är ett problem som vattenreningsverk effektivt kan förhindra, men sådana finns sällan i anslutning till åkrar, det blir istället diffusa utsläpp. Marken gödslas för att det ska växa bra. I vissa fall gödslas det onödigt mycket, vilket medför en risk att överskott av kväve och fosfor rinner

ut i närliggande vatten inklusive grundvatten. I Mississippifloden i USA är kväveutsläpp ett stort problem. Problemet har funnits över en tid och är en av huvudorsaken till döda bottnar i Mexikanska golfen, orsakade av syrebrist när organiskt material ska brytas ner. En orsak till att det är så pass mycket kväveutsläpp tros vara att den tidigare roterande odlingen av majs och sojabönor helt bytts ut mot odling av enbart majs för framställning av etanol. Att odla majs och sojabönor växelvis innebär att endast lite gödningsmedel behöver användas. Detta beror på att sojabönan lever i symbios med kvävefixerande bakterier. Dessa kvävefixerande bakterier försörjer både sig själva, sojabönan och till viss del även majsens med kväve (Zhang *et al.* 2017). När endast majs odlas behöver mer gödningsmedel användas, vilket innebär att överskott av kväve och fosfor så småningom rinner ut i Mississippifloden.

5.2.4 Gruvor - en relativt stor kvävekälla i Norrlandsälvar

I Norrlandsälvarna är tillväxten i det akvatiska ekosystemet oftast kvävebegränsad. En konsekvens av detta är att små kvävetillskott kan påverka hela vattensystemet. Från gruvorna i Norrland kommer det kväveutsläpp från sprängämnen som används i malmbrytningen. Sprängämnen består till stor del av ämnet ammoniumnitrat (NH_4NO_3) som innehåller kväve i båda delarna av molekylen. Odetonerat ammoniumnitrat är vattenlösligt och blandar sig in i gruvans dräneringsvatten. Flera metoder testas för att minska sådana kväveutsläpp som trots att gruvan är en relativt liten del av en hel älvs avrinningsområde ändå kan stå för 2 % av kväveutsläppen i älvmynningen till Östersjön. En metod som testas i en pilotstudie är att rena vattnet från nitrat med en denitrifierande bioreaktor. Den placeras under markytan och består av ett poröst organiskt material som vattnet rinner genom. I bioreaktorn finns anaeroba regioner med denitrifierande bakteriesamhällen, det vill säga bakterier som bryter ned nitrat. När vattnet rinner genom dessa zoner reduceras nitraten till kvävgas, vilket gör att en mindre del av kvävet når älvarna. Även vattenväxter kan användas för att få bort kvävet ut vattnet genom att skördas bort dem när de bundit upp kväve i sin biomassa (Choudhury 2018).

5.2.5 Effekter av övergödning i vatten och mark

Övergödning i vatten är en konsekvens av att näringsämnen, framförallt kväve och fosfor, ökar tillväxten av växtplankton (frilevande alger och cyanobakterier). Under den varmare delen av året kan detta innebära en markant ökning av antalet växtplankton, vilket kallas för algbloomning. När tillväxten av växtplankton ökar, så ökar även andelen nedbrytbart organiskt material som sjunker ned mot botten. Där bryts materialet ned av aeroba mikroorganismer, vilket succesivt leder till att mer och mer syre förbrukas. När syrenivån nått ned till en viss nivå, är det svårt att få den att öka igen. Konsekvenserna av syrebrist blir att alla organismer som förbrukar syre, inte längre klarar av att leva. När djur som lever i sedimenten dör så slutar också syret att tillföras till sedimenten. Fosfor som med tack vare syret tidigare varit uppbundet i sedimenten, börjar då frigöras, vilket gör problemet med övergödning ännu värre (Breitburg *et al.* 2018). Uppe på land får mark som mättats med kväve,

förändrad vegetation och ofta tar en eller flera arter överhand vilket leder till minskad biologisk mångfald.

5.2.6 Åtgärder för att minska kväveutsläpp i vatten

För att få stopp på övergödning i vatten är det huvudsakliga målet att minska överanvändandet av gödningsmedel, något som även skulle minska kostnaderna för bönderna (Breitburg 2018). För att minska övergödning från odling av biobränslen, är ett alternativ att istället odla grödor såsom rödhirs, eukalyptus eller poppel. Dessa grödor går att odla på jordar av sämre kvalitet i jämförelse med sojabönor och majs, samtidigt som de kräver mindre underhåll.

5.3 Kväveutsläpp och marknära ozon

Ozon är en gas som består av tre syremolekyler (O_3) och förekommer naturligt i stratosfären på ca 10-50 km höjd där den skyddar oss från farlig strålning. Det mesta ozonet finns på denna höjd. Denna ansamling av ozon kallas därför ozonlagret. Det finns dock även marknära ozon, alltså ozon som är vid eller nära marken och som har andra miljökonsekvenser än ozonet uppe i stratosfären. På hög höjd (i stratosfären) bildas ozonet genom att UV-strålningen från solen klyver en syremolekyl (O_2) i två varpå de ensamma syreatomerna kan slås ihop med en hel syremolekyl. (SMHI 2018). Reaktionen blir:



därefter kan en syreatom slås ihop med en syremolekyl:



Marknära ozon bildas då kemiska reaktioner sker i förorenad luft i närvaro av solljus. Reaktionerna är främst mellan flyktiga organiska ämnen och kväveoxider (Miljömål 2018). Marknära ozon är hälsofarligt vid kontakt med människor, djur och växter då den är kraftigt oxiderande (SMHI 2018a). Marknära ozon kan brytas ned av kväveutsläpp från avgaser från trafiken, därför kan de marknära ozonhalterna vara lägre i storstäder än på landsbygden eftersom det är mycket trafik på en liten yta där (Naturvårdsverket 2018a). Kväveoxider kommer främst från förbränning där fordonstrafiken, el- och värmeproduktion och vissa industrier bidrar mest. Flyktiga organiska ämnen frigörs både naturligt från växter och släpps ut av lösningsmedel i färg och ytbehandling men även av spolarvätska, tändvätska och vid eldning (Naturvårdsverket 2018a). Bildat marknära ozon är långlivat vilket medför att det kan färdas långa sträckor med vinden. Detta leder till att ozon och även ozonbildande ämnen importeras till Sverige från mer tätbefolkade områden. När högtryck med svaga vindar bildas i centrala Europa kan höga halter marknära ozon bildas i området eftersom vindarna inte driver bort ozonet. När högtrycket släpper kan stora mängder ozon transporteras till Sverige och orsaka ozonhalter som är 2-3 gånger högre än det normala värdet under några dygn (Miljömål 2018).

5.3.1 Miljökvalitetsnormer för ozon

I luftkvalitetsförordning (SFS 2010:477) finner man de miljökvalitetsnormer (MKN) som regeringen skapat, dels för att säkerställa att man efterlever krav ställda av EU men också för att säkerställa att medborgares hälsa samt miljön skyddas. Gränshalterna för marknära ozon anges med så kallad målsättningsnorm vilket innebär att det satta värdet ska *eftersträvas* medan en gränsvärdesnorm innebär att värdet ska *följas*. Dessa normer gäller utomhusluften i hela Sverige bortsett från arbetsplatser samt trafikerade tunnlar. De flesta miljökvalitetsnormerna kontrolleras av kommunerna, men ansvaret för kontroll av marknära ozon ligger på Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2018b). Miljökvalitetsnormen för marknära ozon mäts med ett så kallat åttatimmarsmedelvärde. Detta innebär att man under dygnets 24 timmar, för varje timme, beräknar de senaste åtta timmarnas medelvärde. Utifrån dessa bestämmer man sedan dygnsvärdet genom att lokalisera det högsta åttatimmarsmedelvärdet (Sveriges riksdag 2010).

Regeringen har beslutat att miljökvalitetsnormen för marknära ozon ska ligga på $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ luft (Naturvårdsverket 2018d). Utöver denna norm finns det även miljömål satta av riksdagen. Dessa miljömål innebär inget juridiskt bindande men har införts då vissa luftföroreningar kan medföra skador redan under de satta miljökvalitetsnormerna (SMHI 2016). På sverigesmiljomal.se (Sveriges miljömål uå) kan man finna de preciseringar som formulerats för miljömålet ”frisk luft”. De lyder: ”Halterna av luftföroreningar överskrider inte lågrisknivåer för cancer eller riktvärden för skydd mot sjukdomar eller påverkan på växter, djur, material och kulturföremål.” Med anledning av dessa ledord har man satt gränsen för marknära ozons miljömål till $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ luft beräknat enligt samma princip som MKN, samtidigt som timmedelvärdet inte får överstiga $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ luft.

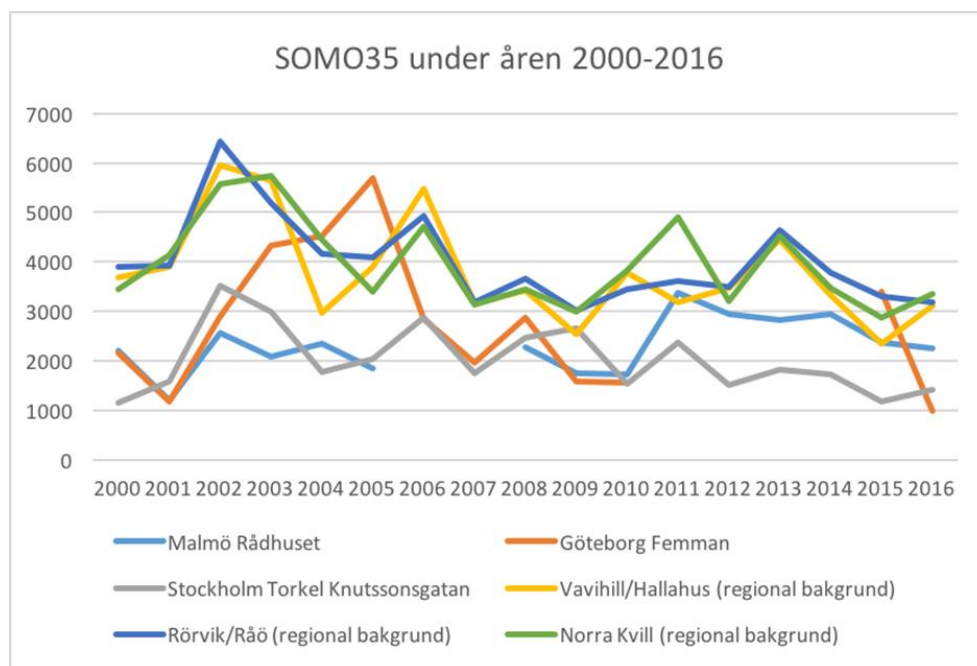
Enligt Naturvårdsverket (2018e) kommer denna precisering inte kunna klaras till år 2020 som önskat. Detta mycket till följd av att mängden använt lösningsmedel, Sveriges primära utsläppskälla, har haft en ökande trend de senaste fem åren. Faktum är att även om mängden utsläpp av flyktiga organiska ämnen, bortsett metan, har mer än halverats inom EU mellan åren 2000 och 2015 så har årsmedelvärdena i Sverige för det marknära ozonet förblivit oförändrat under samma period. Dessa preciseringar överskrids faktiskt med marginal i hela Sverige och gör så med geografiskt varierande trender, där mätningar visar att nivåerna i flera städer ökat och t.o.m. inte ens klarar de satta MKN-värdena. I Malmö uppgick värdena under 2016 till hela $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ luft, alltså det dubbla det satta miljömålet (ibid).

5.3.2 Hälsoeffekter av marknära ozon

Marknära ozon har en hälsovådlig effekt på människan. Exponering av farligt höga halter av marknära ozon kan bland annat bidra till irriterade slemhinnor samt ögon och kan leda till inflammerade luftvägar, något som kunnat ses i det ökade antalet inläggningar på sjukhus på grund av denna typ av besvär (Naturvårdsverket 2017b). Hos astmatiker eller liknande kan detta leda till problem med andningen. Långvarig exponering av höga halter ozon kan innebära utvecklande av astma och

även leda till kortare livslängd. Dessutom finns det statistik som pekar på att höga halter ozon kan ha en inverkan på utfall av graviditeter (Naturvårdsverket 2018a). Framförallt har ozonet kopplats samman med prematur födsel (WHO 2013).

SOMO35 är en indikator på hur stor exponering av ozon människor utsätts för (Figur 26). Denna har tagits fram av WHO (Världshälsoorganisationen) och beräknar summan av åttatimmarsmedelvärdet överstigande miljökvalitetsmålet på $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ luft för varje dag under ett år (Naturvårdsverket 2017c). Trots att denna indikator minskat något de senaste 10 åren har det antal dagar som gränsvärdet överstigs i Sverige ökat. Dock beräknas de förkortade livslängderna orsakade av marknära ozon ha minskat med 24 % mellan åren 1990 och 2015. En trend som ser ut att fortsätta till 2020 (Naturvårdsverket 2018a).



Figur 26. Index SOMO35 under åren 2000-2016 på utvalda platser. Källa: Naturvårdsverket 2017c.

5.3.3 Effekter av marknära ozon på växter

Utöver hälsovådliga effekter på människor har marknära ozon även en påverkan på växtlighet. Detta kan ses genom t.ex. skador på och kortare livslängd hos växternas blad, något som kan hämma växternas möjlighet till fotosyntes. Detta innebär stora ekonomiska förluster inom skogs- och jordbruk. Utöver detta påverkar ozonet även växternas kolupptag negativt, vilket har en effekt på klimatet (Miljömål 2018). Denna påverkan på skogs- och jordbruk uppstår redan vid låga halter förekommande i opåverkade miljöer enligt Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2018a). De ekonomiska förlusterna till följd av detta uppskattas till totalt minst en miljard kronor årligen. Det är troligt att vilt växande växter och odlade grödor påverkas likvärdigt av ozonet vilket kan innebära en negativ inverkan på ozonkänsliga växters konkurrenskraft.

För att kunna bedöma ozonets påverkan på växter uppmäter man ett ozonindex, AOT40. Detta index är normalt sett lägre i norra delen av landet än vad det är i södra delen av landet med en medelminskning på 5 % årligen. Denna minskning är dock kraftigt geografiskt varierande och trots dessa minskningar överstiger majoriteten av mätningarna i landets södra delar de satta gränsvärdena för miljö kvalitetsmålet. Då nyare forskning har uppkommit har dock FN:s luftvårdskonvention skapat ett nytt ozonindex, men trots detta överstiger mätningarna i Sverige de satta gränsvärdena. För att klara denna nya konvention jobbas det nu med att ta fram ett nytt ozonindex för Sverige, en ”fluxrelaterad ozondos”, men det jobbas även med att ta fram en ny precisering av miljömålet (Naturvårdsverket 2018e).

5.4 Ozonet i stratosfären – roll och trender

Till skillnad från marknära ozon är ozonskiktet (eller ozonlagret) bra för hälsan då det absorberar UV-B-strålning från solen vilket är livsviktigt för människor, djur och växter eftersom UV-B-strålningen kan sönderdela molekyler och därmed orsaka hudcancer, synskador och försämra immunförsvaret (Naturvårdsverket 2018c). Ozonskiktet påverkas dock av människans utsläpp av ozonnedbrytande ämnen. Under 1980-talet kom de första mätningarna på att ozonskiktet hade tunnats ut av framförallt CFC (klorfluorkarboner eller freoner) som användes i isolering och som köldmedium i kylar och frysar. Reaktionerna är:



Till följd av detta kom år 1987 Montrealprotokollet, ett internationellt avtal för att begränsa användningen av CFC och andra ozonnedbrytande ämnen. Tack vare avtalet stannade uttunnningen av ozonlagret över Europa vid 5-10%, till skillnad mot en uttunning på 50 % som man tror att lagret skulle tunnats ut till om avtalet inte skrivits under. Antarktis drabbades dock mer av utsläppen vilket har lett till ett återkommande ”ozonhål” varje vår då skiktet halveras. Läget för ozonlagret har dock inte förvärrats sedan 1990-talet och man tror att ozonhalten i stratosfären kommer öka de kommande åren eftersom CFC-halterna i atmosfären börjat minska (SMHI 2018b).

5.5 Metallutsläpp vid förbränning

Ett annat miljöproblem vid förbränning av både biobränslen och fossila bränslen är utsläpp av tungmetaller som bly, kadmium, arsenik, nickel och kvicksilver för att nämna några. Efter förbränning återfinns dessa tungmetaller till exempel i bottenaska, flygaska och i rökgas. I Sverige är de luftburna halterna låga, men hittas i marken efter nedfall, och i närheten av i industrier (Naturvårdsverket 2018). För att

minska utsläppen av dessa är verkningsgraden hos reningsmekanismen av stor betydelse, då små mängder tungmetaller kan göra stor skada på vår hälsa (Naturvårdsverket 2005).

5.6 Hur klimatsmarta är bibränslen? Tidsaspekten

Sett över tid så är bibränslen väldigt klimatsmarta i jämförelse med om vi ska fortsätta använda fossila bränslen, då de bara förbränner koldioxid som bundits de senaste åren i jämförelse med fossila som släpper ut koldioxid som kan ha bundits för flera miljoner år sedan. Nettoutsläppen vid förbränning av bibränslen brukar ses som noll om man ser över en längre tid t.ex. ett träd livslängd, och används koldioxidavskiljare kan utsläppen till och med bli negativa. Men i och med att förbränningen av bibränsle sker så mycket snabbare än tiden det tagit att binda mängden koldioxid så kan förbränning av bibränslen ändå ses som negativa i ett kort tidsperspektiv. (Hammar 2018)

5.7 Skogen som kolsänka och kolförråd

Skog binder koldioxid när den växer och ett intensivare skogsbruk möjliggör därför att kunna binda ännu mer koldioxid. Virkesmängden i Sveriges skogar har på grund av det skogsbruket dubblats de senaste 100 åren. Idag i Sverige uppskattas växande träd binda 35 miljoner ton koldioxid per år, vilket kan jämföras med att hela Sverige släpper ut ungefär 68 miljoner ton koldioxid per år. Det finns flera orsaker till den stora virkesmängden i skogen, en del beror på att vi idag utnyttjar större del av landet till skogsbruk än förr och att man avverkat gammal skog till förmån för yngre skog med högre tillväxt. (Sveriges Radio 2015)

Det finns mycket kol lagrad i både själva träden samt i marken, det lagras ungefär dubbelt så mycket kol i marken som ovan i biomassa. En ung växande skog brukar ses som en **kolsänka** som varje år binder stora mängder kol när den växer och som i sig inte har så mycket kol bundet i sig från början. Gamla skogar brukar istället ses som **kolförråd**. I dessa gamla skogar finns mycket kol lagrat i biomassa och i marken och de binder inte särskilt mycket kol varje år. Avverkas skogen släpps kolet ut från både marken och biomassan och det tar ofta 10-20 år innan ett avverkat område börjar fungera som en kolsänka igen. Det är alltså en dålig idé att avverka gammal skog med mycket kol lagrat i sig om man tänker elda den. Detta på grund utav att det tar många hundra år att bygga upp samma kolreserver igen. Om man istället gör virke eller återvinningsbara produkter av den gamla skogen kan man dock tjäna på att avverka den i förmån för ny skog som binder väldigt mycket de första åren. (Klimatet och skogen 2017)

Vid intensivodling av skog är kvävegödsling en vanlig åtgärd för att öka skogens tillväxt. Detta ökar skogens förmåga att binda kol i marken. Studier visar att kvävegödsling kan resultera i att skogen kan binda 7-15 kg mer kol per kg tillsatt kväve. Barrträd bygger snabbare upp ett kolförråd i marken än lövträd, och på lång sikt

binds det alltid mer kol i marken i skogsbeklädda landskap än öppna. En ökad mängd kväve bidrar även till en långsammare nedbrytning av material som även det medför att mer kol binds i marken. Men det medför även ökad utlakning av kväve till grund- och ytvatten som kan resultera i övergödningsproblem. (Larsson *et al.* 2009)

5.8 Marken som källa eller sänka för växthusgaser

Utöver de stora skogsområden vi har som agerar kolsänkor i vår natur så har vi i Sverige även stora områden av torvmarker som agerar kolsänkor, men alla myrar i Sverige fungerar inte som kolsänkor som binder kol genom tillväxt varje år, då vissa är dikade eller förstörda. Det är tack vare att en så stor del av biomassan i en myr ligger under vattnet som den inte avger någon koldioxid utan i princip bara binder koldioxid när den växer. Myrars tillväxt kan ske vid både varmare och kallare temperaturer men är känsliga för uttorkning, som framförallt sker om vattentillgången rubbas av till exempel dikning. Om en myr blir torr så kommer koldioxid att börja avges. (Svenska Dagbladet 2007)

5.9 Risk att förlora biologisk mångfald

Att bedriva ett intensivt skogsbruk har stora negativa effekter på den biologiska mångfalden i ett område. Genom att ha intensivodlingar av träd blir det färre arter i området samtidigt som några få arter kommer att ta över området jämfört med en orörd skog i samma område. Odling av gran har mest negativ inverkan på den biologiska mångfalden. Till exempel kan bärris (som lingon och blåbär) minska med 95 % vid intensivodling av gran. Artantalet fåglar minskar med upp mot 70 % vid intensivodling av gran och contortatall. Detta då en hög mångfald av fågelarter kräver en stor mångfald av både träslag samt ålder på träden med förekomst av gamla boträd och död ved. Allt detta försvinner vid intensivodling i utbyte mot homogena skogar av samma art i samma ålder. Av alla rödlistade arter som finns i Sverige bedöms ingen av dessa kunna dra fördel av dessa intensivodlingar av träd oavsett om de består av gran, contortatall eller hybridasp, däremot finns det ungefär 100 rödlistade arter som lever i skogar som potentiellt skulle kunna avverkas och börja brukas med intensivt skogsbruk. (Larsson *et al.* 2009)

5.10 Koppling till svenska och globala mål

5.10.1 Svenska miljömålen

Vad det gäller Sveriges miljömål **Begränsad klimatpåverkan** ser det målet ut att misslyckas. Introduktionen av biodrivmedel går alldeles för långsamt i dagens läge för att nå upp till målen. "Luften ska vara så ren att människors hälsa samt djur, växter och kulturvärden inte skadas". Det är den definitionen riksdagen tilldelat **Frisk Luft-målet**. Marknära ozon är en av de mest hälsovådliga luftföroreningarna

och i avsnitt 5.3 har vi lagt fram de skador som kan drabba människor, djur och växtliv till följd av för höga nivåer av detta. Målet för Frisk Luft kommer inte nås till 2020 men trenden är positiv även om just ozonhalterna ligger långt ifrån de satta målen, främst i tätorter (Sveriges miljömål 2018). Det går även att argumentera för att marknära ozon kan ha en inverkan på miljömålen **Begränsad klimatpåverkan, Levande skogar och Ett rikt växt- och djurliv**.

De övergödande effekterna av kväveutsläpp vi tar upp i detta kapitel hör ihop med **Ingen övergödning**-målet. Med nuvarande styrmedel och åtgärder kommer målet inte uppnås. Den effekt övergödningen har är långlivad och trots att åtgärder genomförs tar det lång tid att se effekterna i naturen (Naturvårdsverket 2018).

5.10.2 FN:s globala mål

Att öka användningen av biobränslen (som bioetanol, RME, biogas) är starkt kopplade till mål 7 (Hållbar energi för alla), mål 9 (Hållbar industri, innovationer och infrastruktur), mål 11 (Hållbara städer och samhällen), mål 12 (Hållbar konsumtion och produktion) och mål 13 (Bekämpa klimatförändringen) då dessa mål handlar om produktions- och energifrågor. Biobränslen tillåter en stor minskning av koldioxidutsläpp och kan även användas som reservkraft (att tillverka el genom förbränning av diverse bränslen är dock sällan lönsamt och bör endast göras i nödfall). Avfallsproblemet (biologiskt avfall) kan också åtgärdas med hjälp av biobränsleproduktionen. De satsningar som görs på biodrivmedel är mycket viktiga för att minska beroendet av fossila bränslen. Problemet är att i många fall är biodrivmedel inte helt klimatneutrala utan har fortfarande positiva utsläpp sett till hela livscykeln trots att de görs på förnybara råvaror.

Dålig och icke-genomtänkt produktion av biobränslen kan dock påverka **mål 2 (Ingen hunger)** och **mål 15 (Ekosystem och biologisk mångfald)** på ett väldigt negativt sätt då vissa biobränslen (t.ex. etanol tillverkad från grödor som kan nyttjas inom matsektorn) konkurrerar med matproduktionen eller kan leda till minskad mångfald.

Intensivodling av skog kan kopplas både till **mål 13 (Bekämpa klimatförändringarna)** och **mål 15 (Biologisk mångfald)**. När skog växer binder den väldigt mycket koldioxid och när stora skogsområden avverkas läcker både marken ut koldioxid och man reducerar då kraftigt bindningen av koldioxid i detta område. Detta gör att hur man hanterar sin skog har stor betydelse för koldioxidhalterna i luften.

5.11 Instuderingsfrågor

- Nämn två fördelar och två nackdelar med biobränslen från åkrar
- Vad är deponigas och hur bildas den?
- Vad har ozonlagret för betydelse för människor, djur och växter?
- Hur bildas marknära ozon?

- Vilka är de överliggande hälsoriskerna för människan vid exponering av höga halter marknära ozon?
- Vad innebär miljö kvalitetsnorm respektive miljömål och vad skiljer dessa åt?
- Nämn två exempel på åtgärder för att minska kväveoxidutsläpp.
- Förklara begreppen kolsänka respektive kolförråd och ge exempel på var dessa kan förekomma.
- Nämn två fördelar och två nackdelar med intensivodling av skog
- Hur kommer det sig att kväveoxidutsläppen är samma eller till och med högre vid förbränning av biobränslen jämfört med fossila bränslen?
- Varför leder övergödning till syrebrist i haven?
- Hur påverkas Norrlandsälvarna av att odetonerade sprängämnen blandas i vattnet?

6 Vattenkraft och dess miljöpåverkan

Vattenkraft är den rörelseenergi som kan utvinnas från vattnet som strömmar i floder, älvar och andra vattendrag. Det är den ledande förnyelsebara energikällan i världen och genererar 71 % av all förnyelsebar el. Med en installerad effekt på 1,064 GW år 2016 genererade vattenkraftverk 16,4% av all världens el (World Energy Council 2016).

6.1 "Råvarutillgång" och länder som utnyttjar och vill utnyttja vattenkraft

2015 producerades cirka 4 000 TWh från världens vattenkraftverk (World Energy Council, 2016). Den tekniskt möjliga potentialen för vattenkraft i världen uppskattas till nästan 15 000 TWh/år. Råvarutillgången är vida utspridd och finns i runt 150 av världens länder (Bartle 2002).

Vattenkraften håller på att byggas ut kraftigt. Mellan 2005 och 2015 ökade den installerade effekten i världen med 39 %. Den genomsnittliga ökningen var knappt 4 % per år. Den största förändringen av installerad vattenkraft sedan 2004 har gjorts i mindre utvecklade länder. Kraftig utbyggnad av vattenkraft har gjorts i Asien (framförallt Kina), Afrika och Sydamerika. Utöver den förnyelsebara energin ett vattenkraftverk producerar görs även andra vinster. Byggnaden av ett vattenkraftverk görs ofta i samband med en upprustning av områdets vattensystem. På så sätt förbättras ofta möjligheterna till dricksvatten, vatten till industrier och vatten till bevattning i områden där det byggs vattenkraftverk (World Energy Council 2016).

Tabell 9. Länder med mest installerad kapacitet av vattenkraft Källa: World Energy Council 2016.

Land	Kapacitet 2015 (GW)	Utökad kapacitet 2015 (GW)	Produktion (TWh)
Kina	320	19	1 100
USA	100	0,1	250
Brasilien	92	2,5	380
Kanada	79	0,7	380
Indien	52	1,9	120
Ryssland	51	0,2	160

I Tabell 9 ser man att Kina är den klart största producenten av vattenkraft i världen. Kina är även det landet som byggt ut sin vattenkraft överlägset mest jämfört med de andra topproducenterna. Noterbart är även att de länder med högst installerad effekt inte nödvändigtvis är det som producerar mest energi. Det kan ses på att till exempel Brasilien producerar klart mer energi än USA trots att den installerade kapaciteten i Brasilien är lägre. Det beror på att vattenkraftverk inte producerar på

maximal nivå hela tiden, på grund av att det används som reglerkraft eller naturliga ojämnheter i vattenflödet (World Energy Council 2016).

Tabell 10. Länder med störst utnyttjad potential för vattenkraft. Källa: World Energy Council 2016.

Land	Outnyttjad potential (TWh/år)	Total potential (TWh/år)	Andel utnyttjad potential
Ryssland	1 510	1 670	10 %
Kina	1 010	2 140	47 %
Kanada	805	1 180	32 %
Indien	540	660	18 %
Brasilien	436	818	47 %
Indonesien	388	402	3 %
Peru	369	395	7 %
DR Kongo	307	314	3 %
Tadjikistan	299	317	6 %
USA	279	529	47 %

I Tabell 10 visas vilka länder som har mest utnyttjad potential av vattenkraft. Det går också att utläsa vilka av dessa länder som utnyttjar mycket respektive lite av sin potential. Till exempel har Kina mer utnyttjad potential än Indonesien trots att man utnyttjar en klart större andel av potentialen (World Energy Council 2016). Om kontinenterna undersöks så ses det att Asien har störst potential för vattenkraft (7195 TWh/år). Förutom Kina, Indien och Ryssland gör även Turkiet, Nepal och Bhutan stora satsningar på vattenkraftverk (World Energy Council 2016). Sydamerika och Afrika har mycket potential som i dagsläget inte utnyttjas. Hela Sydamerika och centrala Afrika är områden med väldigt stor potential redo att användas. I Afrika används så lite som 9 % av den potentiella vattenkraften. Länder som till exempel DR Kongo, Angola, Etiopien och Kamerun har de absolut största potentialerna av de afrikanska länderna (World Energy Council 2016).

6.2 Vattenkraft i Sverige – småskaligt till storskaligt

Det finns idag cirka 2100 vattenkraftverk i Sverige, med stor variation i kapacitet. Totalt produceras mellan 50–75 TWh per år. Det motsvarar 30–45 % av elanvändningen, inklusive export (Naturskyddsföreningen uå). Potentialen för utbyggd vattenkraft i Sverige bedöms till ytterligare ungefär 30 TWh per år. Av dessa är cirka 14 TWh nationalälvar, cirka 10 TWh vattendrag med särskilda bestämmelser enligt miljöbalken och cirka 6 TWh vattendrag med vattenkraftanläggningar. Den största potentialen får alltså inte utnyttjas enligt bestämmelser trots att det finns mycket energi möjlig att utvinna. De 6 % som återfinns i vattendrag med redan befintliga vattenkraftverk är de som får utnyttjas. Det gör enklast genom att redan befintliga vattenkraftverk förbättras och därmed kan ge mer energi (Svensk Energi 2015).

Det finns 208 storskaliga vattenkraftverk. För att kallas storskaligt behöver effekten vara mer än 10 MW. Resterande cirka 1900 vattenkraftverk är småskaliga. Trots att det finns mycket fler småskaliga vattenkraftverk står de storskaliga för 94 % av den producerade energin. De cirka 1000 minsta vattenkraftverken står endast för 0,5 % av den producerade energin (Naturskyddsföreningen uå.).

Endast 2 % av vattenkraftverken har miljöanpassat sin verksamhet. De allra flesta saknar därmed fungerande passager för upp- och nedströmsvandring för fiskar och är därmed vandringshinder. Myndigheterna har svårigheter att ställa krav på vattenkraftverkens miljöanpassning. De allra flesta vattenkraftverk i Sverige har mycket gamla tillstånd. Mer än 80 % har till exempel fått sitt tillstånd 1918 eller tidigare. För att ge vattenkraften moderna miljötillstånd antog regeringen 2020 en nationell plan för omprövningen av vattenkraften (Sveriges Domstolar 2021). Under 20-års tid ska omprövningar och nya tillstånd tas fram för vattenkraftverken enligt en nationell plan i samarbete mellan Havs- och vattenmyndigheten, Energimyndigheten och Svenska kraftnät (Havs- och vattenmyndigheten uå). Omprövningen görs för att vattenkraften ska minska sin påverkan på ekosystemen och få en effektiv tillgång till vattenkraftsel (ibid). Åtta svenska energibolag har bildat en miljöfond för att hjälpa vattenkraftsägare att utreda och anpassa sina kraftverk till moderna miljövillkor (Vattenkraftens miljöfond uå). De har beräknat att hela omprövningen kostar 10 miljarder kronor och möjliggör för små vattenkraftägare att söka bidrag till omprövning (ibid).

Vattenkraften har även en stor betydelse som reglerkraft. Den står för all automatisk frekvensreglering och nästan all manuell frekvensreglering på det svenska elnätet. Det behövs reglerkapacitet mellan dag och natt, helger och vardagar samt mellan sommar och vinter då dessa tidsperioder medför olika förutsättningar för produktion av annan el, som vind- och solexel. Det är de 208 storskaliga vattenkraftverken som står för reglerfunktionen. Det är för att det behövs dammar för att samla upp stora mängder vatten, som småskaliga vattenkraftverk i regel inte har. Vattenkraftverken i Sverige har ungefär 30TWh lagringskapacitet (Energimyndigheten 2014).

6.3 Effekter när man översvämmar mark vid dammbygget

Vid anläggning av dammar svämmas mark över. Detta innebär ett antal miljökonsekvenser på lokal nivå som förändringar i ekosystemen, men även påverkan på klimatet i stort då dammarna skapar utsläpp av växthusgaser.

6.3.1 Växthusgasutsläpp vid kraftverksdamm

När mark blötläggts hamnar dess biomassa under vatten. Resultatet blir att växtligheten förmultnar och släpper ut det kol som varit bundet i denna massa. Utsläppen sker i form av gaserna koldioxid och metan. Mängden växthusgaser som släpps ut varierar beroende på vilken typ av mark som översvämmas. Exempelvis släpper

torvmarker ut mer än skogsmarker. En ytterligare faktor som påverkar mängden utsläpp är det lokala klimatet. Ett varmare, mer tropiskt klimat leder till större utsläpp då den högre temperaturen främjar mikrobiell nedbrytning av organiskt material (Abril *et al.* 2005). Vidare innebär översvämning av områden med mycket växtlighet att en koldioxidsänka försvinner. Detta på grund av att växterna inte längre kan binda koldioxid från luften (St. Louis *et al.* 2000).

6.3.2 Minskad biologisk mångfald i dammens strandzon

En konsekvens av översvämningen av mark vid dammbygget är förändringar av det tidigare landecosystemet i närområdet. Då en del av markytan hamnar under vatten skapas ett habitat som är helt olikt det föregående vilket leder till en förändring av både flora och fauna. Ett exempel på en art som minskat av översvämning av mark vid dammbyggen är växten klådris som återfinns kring vattendrag och strandkanter i särskilt i norra Sverige (Sveriges Radio 2016).

Strandzonen i en sjö är naturligt en mycket artrik miljö - det är nästan alla typer av kantzoner mellan två olika habitat i naturen. I strandzonen kommer solen åt och växter trivs som ger utrymme för insekter och fisk. När vattennivån i en kraftverksdamm ständigt ändras eroderas kantzonen till en nästan steril stenöken vilket minskar både antalet arter och tillväxten hos de arter som finns kvar (Älvräddarna uå). Mer om strandzonens funktion och påverkan finns i avsnitt 6.5

6.3.3 Kvicksilver

En allvarlig konsekvens av översvämning av ett markområde är det sker utlakning av tungmetaller. Utlakning innebär att lösliga ämnen frigörs från mark och följer med avrinnande vatten till vattendrag och sjöar. Dessa lösliga ämnen kan exempelvis vara metalljoner och om marken i fråga är förorenad med tungmetaller släpps dessa ut i vattnet. Av tungmetallerna utgör kvicksilver det största hotet för djur och människors hälsa (se stycke 6.3.3). Anledningen till att utlakningen av tungmetaller i just reservoarer är problematisk beror på den anaeroba miljön som råder i sedimenten (Morin 2006). Under syrefattiga förhållanden kan kvicksilvret metyleras och därmed bildas en organisk form av kvicksilver, metylkvicksilver, som är mycket giftig och kan tas upp av levande organismer (Noring 2015).

Kvicksilver är en metall som i sig själv, samt i föreningar, är hälsovådlig. Kvicksilverhalten är för höga på många ställen i naturen. Nedfallet av kvicksilver över Sverige beräknas vara 4,2 ton per år. Sveriges egna utsläpp till luften är 0,7 ton per år. Kvicksilver bildar föreningen metylkvicksilver som ackumuleras i höga halter i de högre skikten av näringskedjan. Framför allt insjöfisk innehåller mängder som passerar gränsvärdet på 0,5 mg kvicksilver per kg fisk. Detta gäller hälften av Sveriges sjöar (Kemikalieinspektionen 2015). Det är som en förening med en metylgrupp som kvicksilver kan ackumuleras i levande organismer. Efter utlakning från exempelvis översvämmad skogsmark gör reservoarens miljö att metylering kan ske (Kallio 2014).

Kontakt med kvicksilver har negativ påverkan på människor. Framför allt nervsystemet, immunsystemet samt lungor och njurar tar skada av exponering av metallen eller dess organiska föreningar. Två grupper är mest utsatta: foster som utsätts för kvicksilver i livmodern genom den organiska föreningen metylkvicksilver, vilket är ett resultat av moderns diet. Den andra gruppen är de som under sin livstid har kronisk exponering av metallen. Bland annat gäller detta människor som har en diet baserad på fisk, samt de som arbetar i närhet av metallen. De två gruppernas hälsa påverkas på olika sätt. I foster som fått i sig kvicksilver försämras utvecklingen av hjärnan och nervsystemet vilket i sin tur leder till bland annat problem med minne och finmotorik samt koncentrationssvårigheter (WHO 2017). Även de som utsätts för kvicksilver senare i livet får neurologiska skador. Bland annat har det rapporterats fall av minnesförlust, sömnproblem och skakningar. WHO bedömer kvicksilver att vara en av de topp 10 kemikalierna som är av störst fara för mänskligheten (WHO 2017).

6.4 Dammen som vandringshinder

6.4.1 Barriäreffektens påverkan på fiskar

Vattendrag, som bäckar, åar, älvar och floder, tillåter förflyttning för fiskar såväl uppströms som nedströms. Vandring i båda riktningar är ett naturligt beteende för många fiskarter. När ett vattenkraftverk placeras i ett vattendrag begränsas dessa färdvägar, någonting som kallas för barriäreffekt. Denna effekt resulterar i ett flertal olika konsekvenser för vattenlevande organismerna.

Arter som drabbas hårt av vandringshinder är framför allt de som naturligt vandrar mellan saltvatten och sötvatten, dessa arter kan delas upp i två typer. De anadroma arterna leker (reproducerar sig) i sötvatten men växer upp i havet. Exempel på dessa är lax, havsöring och flodnejonöga. De anadroma arterna får på grund av utbyggnaden av vattenkraft mycket svårt att ta sig uppströms till sina lekplatser. Katadroma arter, såsom till exempel vissa ålar, har det motsatta beteendet mot de anadroma, de leker i havet och växer upp i sötvattendrag. Båda typer av arter påverkas på liknande sätt av vattenkraftens utbyggnad. (Näslund *et al.* 2013)

Andra vandrare arter påverkas av samma effekter. Öring, harr, röding och sik växer naturligt upp i sjöar/stora älvar och reproducerar sig i strömmande vatten. Abborre och gädda är exempel på arter som övervintrar i sjöar eller större vattendrag, men på grund av barriäreffekter har arterna svårare att ta sig till dessa platser. (ibid)

6.4.2 Konsekvenser i biotopen

Vattenkraftverken bidrar alltså till att begränsa de naturliga rörelsemönstren hos många arter. Om inte arterna kan röra sig fritt fastnar vissa individer i ett specifikt område, dessa fragmenteras och populationer som befinner sig på olika platser i vattenflödet blir till slut genetiskt isolerade (ibid).

Att fisken inte kan röra sig som den borde gör också att den växer sämre, den får helt enkelt ett mindre område att göra sitt födosök inom. Vilket tillsammans med näringsbristen i vattnet som beror på att sediment innehållande mycket näring lägger sig på dammens botten (se avsnitt 6.6) gör att den totala biomassan för fisken minskar. Det kan visa sig genom att bestånden blir småväxta eller individerna färre (ibid). Till slut kommer de dämnda områdena i stället börja domineras av sjölevande fisk, vilken är bättre lämpad för att leva i stilla vatten. Detta stör de naturliga näringskedjorna. Och eftersom det strömmande vattnet ger en fördel för att de mindre fiskarna ska skyddas från rovfiskarna så börjar bestånden av rovfiskar såsom gäddor växa kraftigt (ibid).

6.4.3 Andra effekter

Trots att begräsningen för uppåtvandrande fiskar ofta är det som diskuteras så är vandring nedströms i draget också ett problem. Människotillverkade delar i vattenkraftverken, såsom tunnlrar och turbiner skadar fiskarna. Detta genom rena kollisioner, men också genom snabba tryckförändringar och turbulens (ibid). Eftersom det största vattenflödet går mot och genom turbinen dras nedåtvandrande fisk dit. Långsmala fiskar som ål klipps itu av turbinerna och är särskilt hårt drabbade.

Korttidsreglering av vattenkraftverk med snabba flödesändringar bidrar även med problem för de strömlevande fiskarna nedströms dammen. Problem är till exempel strandning, bortspolning av fiskyngel och rom samt torrläggning av lekområden (ibid).

Ett annat problem med vattenkraften är att fördämningarna ofta påverkar hur isen lägger sig på vattendragen på vintern. Många fiskar gynnas av att isar lägger sig för att de får bättre förutsättningar och skydd. När vattendragen regleras vilket påverkar strömmarna så kommer inte isen lägga sig som den brukar göra, vilket påverkar arterna som lever där. Regleringen kan också bidra till ökad bildning av kravis på botten, vilket också påverkar bottenfaunan i vattendraget. I de största magasinerna minskar fiskbiomassan mycket, särskilt för de djur som lever bottennära. Detta är en effekt som tros bestå mer än 50 år efter dämningen (ibid).

6.4.4 Flodpärlmusslan

Den hotade flodpärlmusslan kräver ett mycket specifikt habitat för att få ett livskraftigt bestånd. Den kräver att det finns platser på botten som har strömmar med syrgasrikt vatten, rätt substrat samt inte så mycket slam. Dessutom parasiterar flodpärlmusslan på andra arter, och kräver årsungar av öring eller lax som agerar värdfiskar för sina larver för att fullborda livscykeln (ibid). Larverna är beroende av värdfiskarna för transport uppåt i vattendraget eftersom de är för dåliga simmare för att själva transportera sig uppströms. Utan värdfiskarna skulle därför musslorna så småningom spolats ut i havet. När bestånden av dessa fiskar minskar på grund av barriäreffekter så påverkas också andra arter, som dessa musslor (SLU Artfakta 2015). Musslorna kan bli mycket gamla och kan därför finnas kvar i vattendrag

med vandringshinder för fisken, men man ser att beståndet inte är livskraftigt då ingen förnyring sker.

6.4.5 Exempel från andra länder

Det är generellt sätt svårare för storväxta och klumpiga djur att ta sig upp och nedströms i vattendrag med vattenkraft på grund av att de oftare skadas i turbinerna och har svårare att ta sig upp för konstgjorda trappor än till exempel lax. Påverkan på dessa arter är ofta mycket allvarliga och irreversibla, två exempel kommer här. En speciell typ av **delfin**, Baiji, levde och frodades i Kinas floder, men har på grund av fiske, kontaminering av vatten och slutligen utbyggnaden av det gigantiska vattenkraftverket ”Three Gorges Dam” förmodligen helt dött ut (Wood 2018). Också andra stora fiskar såsom **stör** påverkas mycket av vattenkraften eftersom de har svårt att ta sig igenom de faunapassager som finns tillgängliga. Den atlantiska stören har funnits i Östersjön, men då den behöver leka i sötvattensfloder har den helt försvunnit från Östersjön i och med utbyggnader av vattenkraft samt föroreningar (Havs- och vattenmyndigheten 2018).

6.4.6 Faunapassage - en åtgärd för att minska barriären

För att förhindra de barriäreffekter som är beskrivna ovan kan man anlägga vandringspassager för fiskar och andra vattenlevande organismer. Dessa kan vara antingen naturliga passager med bottenmaterial som så bra som möjligt skall likna det naturliga eller tekniska trappor. Då olika fiskar har olika förutsättningar för vandring bör man ta i beaktande många olika parametrar när man ska bygga passager, som lutning, vattenströmning och bottenstruktur hos passagen för att underlätta för de unika arterna på platsen för kraftverket (Rivinoja 2015).

Det finns många sätt att konstruera passagerna, vilka passar olika bra för olika syften som nedströms/uppströms vandring samt för olika arter. Några exempel är: Passage av bassäng/trapptyp, kulvertar, hissar och kanaler. Hur bra passagerna fungerar beror på många faktorer som till exempel vilka arter som finns på platsen och vilken typ av passage som anläggs. Till exempel är det lättare att få till en bra faunapassage vid mindre kraftverk än större och modernt designade passager är effektivare än gamla. Men de passager som undersökts har ändå en relativt hög användningsgrad av arterna på platsen, och visar sig ha en god påverkan på den biologiska mångfalden i ett vattendrag (Rivinoja 2015). Dock var det 2012 endast ca 200 av Sveriges över 2000 vattenkraftverk som hade någon typ av faunapassage, vilket ju är en väldigt låg siffra när passagerna ändå visar sig ha positiva effekter på den biologiska mångfalden i ett vattendrag (Orring 2012).

6.4.7 Djurvänligare turbiner och galler

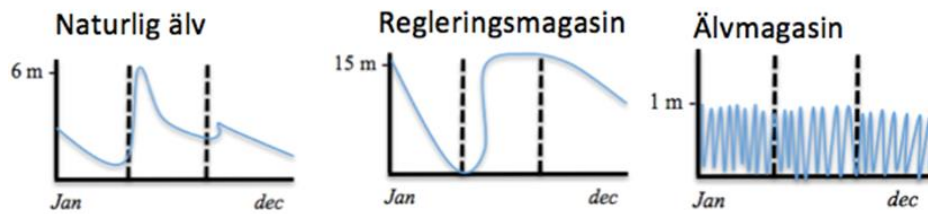
Med högre fallhöjd och större turbin hos kraftverket skadas fisken i högre grad. Vilken typ av turbin man sätter upp spelar också stor roll för fiskarnas välmående. Turbiner av Kaplan-typ verkar generellt vara skonsammare för fiskarna än andra typer av turbiner (Näslund *et al.* 2013).

Intagsgaller finns ofta framför intaget till turbinerna för att se till att drivande material inte skadar maskineriet, men oftast kommer ändå mindre fiskar igenom, vilka då kan skadas i turbinen. Stora fiskar riskerar att tryckas fast mot gallret och dö av utmattning och snabba vattenhastigheter. En lösning på detta problem kan vara att bygga galler som lutar så att fiskarna inte lika lätt trycks fast mot gallret (Petersson 2014).

6.5 Hur dammens reglering påverkar strandzonen i dammen

Strandzonen har många viktiga funktioner i sjöar. Vegetationen vid strandzonen gör att näringsflödet från kringliggande mark till vattnet minskar eftersom växterna i strandzonen tar näringsämnen. Detta är en viktig funktion om vattnet gränsar till jordbruksmark där näring kan läcka ut i större mängder. Vegetationen bidrar även med näring till vattenlevande insekter och fiskar genom att levande eller döda delar av växter såsom blad och annat hamnar i vattnet. Strandzonen och dess vegetation är viktiga reproduktionsområden för dessa djur. Många fiskar fäster sina ägg i den tredimensionella struktur som vattenväxterna bildar.

Skillnaderna i vattennivå är stora under året i regleringsmagasin och älvmagasin jämfört med en naturlig älv (Figur 27). Ett regleringsmagasin har inte stor regleringsintensitet, när den ändras kan den dock gå mellan 20 och 0 meter under året vilket är väldigt stor nivåskillnad då en naturlig älv max går mellan 0 och 6 meter nivåskillnad under året. Detta kan resultera till att mer än 100 meter strandzon växer elvis kan vara torrlagd eller översvämmad. Det leder till att varken terrestra eller akvatiska växter trivs. Den minskade nivån av vattenytan under vintern när säsongslagrade energin används gör att isen dras med och kraftigt eroderar stranden, vilket missgynnar växtligheten ytterligare. I en naturlig sjö är vattenytan bara hög under våren vilket inte leder till häftiga isrörelser under vintern. Kraftverksdammar i mer låglänta områden har inte lika stor nivåskillnad, cirka 0,5 – 1 m. Detta påverkar ändå strandzonerna genom att vegetation minskat till cirka hälften jämfört med ett naturligt älvsystem. I Sverige ligger de största dammarna med störst nivåskillnader i fjällområdet som har natur som värderas högt (Zinko 2005).



Figur 27. Vattenytans höjd under året i sjöar som har en naturlig älv som rinner igenom dem, dammar som är reglermagasin samt dammar som är älvmagasin. Observera de olika skala- lorna på y-axeln.

6.6 Sedimentation och näringsutarmning

När regleringar sker i vattenmagasin och vegetationen i strandzonen eroderas bort, transporteras finkornigt sediment (som oftast har högt näringsvärde) bort från strandkanten till de djupare delarna av dammen, resultatet av detta blir att vattnet i vattenmagasinet blir näringsfattigt. Eftersom kraftverksdammar i Sverige ofta ligger i fjällen, där den omgivande marken är karg och näringsfattig och kommer det inte så mycket ny näring till sjön. Detta leder till att kraftverksdammar i fjällen ofta blir näringsutarmade vilket alltså är motsatsen till övergödning. Kisel är ett näringsämne som är viktigt för vissa typer av växtplankton – kiselalger. Dessa alger är en viktig basföda för djurplankton och bottenlevande djur i sjöar och hav. Födovävar som har dessa växtplankton som bas blir effektiva och ger i slutändan bra och livskraftiga fiskpopulationer. Kisel är svårslösligt i vatten och finns oftast bundet i partiklar i vattnet. När kisel sedimenterar ut i kraftverksdammar leder det till att mindre kisel når havet vilket påverkar kiselalgerna negativt (Sparrevik 2009).

Sedimenterat organiskt material från dammen kan genom mikroorganismers metabolism vid syrefria tillstånd leda till utsläpp av metan som gör att även vattenkraft påverkar den globala uppvärmningen (se kapitel 2 om metan och dess påverkan) (Molander *et al.* 2010). Andra effekter av förminskad sedimenttransport kan vara ökad rasrisk, flödes hastighet och att översvämningsrisken ökar (Sparrevik 2009).

6.6.1 Exempel på näringsutarmning

I Sverige är utmaningen att vissa vatten högt upp i vattensystemen har en alldeles för låg näringshalt i vattnet medan andra ställen har överskott på grund ut av jordbruk och punktutsläpp från reningsverk som ökar kväve- och fosforhalten. Kisel är det dock brist på i hela nedre delen av vattendraget eftersom den mesta andelen har sedimenterats längre upp. Detta resulterar till en dålig närings-mix vid mynningen i Östersjön vilket bidrar till att cyanobakterier som inte behöver kisel gynnas på bekostnad av kiselalger. Cyanobakterier leder ofta till giftiga algblomningar och är inte lika optimal föda för djurplankton som kiselalger vilket leder till en mindre effektiv födoväv. Åtgärder som har gjorts i Sverige för att minska dränkning och torrläggning av strandzoner är att minska regleringsamplituden så mycket som möjligt. Dock har inte detta varit tillräckligt då många strandzoner fortfarande är

skadade. Man har också försökt återinföra effekten av vårfloden som kom naturligt innan alla dammar. Detta för att den går igenom hela vattendraget och tar med sig näring som en naturlig flod. Det har gjorts genom att öka vattenföringen förbi dammen under den tid som vårfloden normalt sker (Sparrevik 2009).

I **Nilen** har vattenkraftverk som byggts, t.ex. Assuandammen, lett till att näringsämnena inte når nedströms och vilket gjort att de årliga översvämningar som tidigare hjälpt till att gödsla åkrar utmed Nilen har behövts kompenseras med konstgödsel. På liknande sätt som i Sverige finns problem med ändrad näringsbalans vid Nilens mynning i Medelhavet, vilket har resulterat i en minskad fiskpopulation i östra Medelhavet. När delar av Nilen dämdes har det observerats att populationen av myggor har ökat, detta är allvarligt då det inte är helt ovanligt att dessa myggor bär på malaria (Abdelsalam *et al.* 2008). Som ett resultat av sedimentationen i kraftverksdammen minskar av lagringskapaciteten i dammen vilket minskar elproduktionskapaciteten och riskerar översvämning vid dammen. En annan effekt av kraftverken är att Nildeltat har krympt på grund av den minskade sedimenttransporten. Årligen har Nilen transporterat 129 ton sediment som avsatts i floddalen och Nildeltat men idag lämnas ca 98 % av detta kvar i dammen (Nixon 2003). Därför måste nu konstgjorda pিরer och vallar byggas för att skydda stränderna i Nildeltat. Totalt påverkas människornas socioekonomiska liv, den lokala miljön och angränsande ekosystem negativt medan dammen ändå gjort att elproduktionen är tryggad.

6.7 Uttorkade flodfåror nedströms kraftverksdammar

Torrfåror är något som uppstår på grund av hur ett vattenkraftverk är byggt. När en anläggning ska byggas, krävs en damm som fångar upp vattnet i ett vattenmagasin. Den konstgjorda dammen placeras mitt i en älvfåra eller vid utloppet i en sjö på ett sätt som hindrar det naturliga vattenflödet (Jonsson 2015). För att nyttja vattnets lägesenergi och skapa en högre fallhöjd byggs gärna dammen så hög som möjligt (Haglund *et al.* 2018). När vattnet leds från dammen i tunnlar ner till turbinerna som ligger djupt nere i berget och vars vatten mynnar ut i älven långt nedströms torkar älvfåran ut mellan dessa (Sparrevik *et al.* 2011). Torrfåran skapar ogynnsamma förhållanden för hela vattenecosystemet. Vandringsvägar som fiskar och andra organismer använder spärras av, ibland flera kilometer, och medför en begränsning av utrymme för bland annat sök av föda och reproduktion (Jonsson 2015).

Torrfåror i nedströms dammar är vanliga. Enligt Sparrevik *et al.* (2011) är större delar av älvfåror vid Vattenfalls storskaliga kraftverk uttorkade på grund av kraftverkens verksamhet. I norra och mellersta Sverige finns det flest större utbyggnationer av vattenkraftverk och därför också flest torrfåror. Sveriges längsta torrfåra finns i Luleälven och är 17 km lång (Malm-Renöfält *et al.* 2015).

6.7.1 Åtgärda torrfåror – minimiflöde

Arter som lever i vattendrag är anpassade efter olika habitat för sin överlevnad. I Sverige varierar arterna beroende på vattenkvalitén och klimatet i olika delar av landet. Men för varelser som trivs i strömberoende ekosystem är inte den geografiska platsen viktig, det är storleken på forsen som spelar roll. Sambandet för påverkan på strömekosystemet är ofta linjärt med hur bra vattnet kan forsa (Malm-Renöfält *et al.* 2015). Tre fjärdedelar av Sveriges älvar redan utbyggda med vattenkraftverk och vid dessa småskaliga och storskaliga stationer lyder gamla lagar för hur ett vattenkraftverk skulle byggas (Jonsson 2015).

En åtgärd för att dämpa vattenkraftverkens negativa miljöeffekter är att skapa ett minimiflöde i torrfåran genom att tappa vatten hela tiden. Med hjälp av en s.k. minimitappning går det att återföra ett artificiellt flöde som liknar det naturliga habitatet för organismerna men flödet kraftigt eftersom det mesta vattnet fortsatt går via turbinerna. Detta alternativ återskapar delvis det strömberoende habitatet för de hotade akvatiska arterna och medför positiva ekologiska effekter (Sparrevik *et al.* 2011). Ett exempel på ett etablerat minimiflöde i Sverige är i Mörrumsån, Hemsjö övre där det står ett vattenkraftverk på 5,2 MW med 15 meters fallhöjd. I den 1,8 km långa fåran nedströms dammen tappas vatten under sommarhalvåret med en kubikmeter per sekund och under vinter halvåret med en halv kubikmeter per sekund. Även större mängder vatten, tre kubikmeter per sekund, tillförs vissa dagar för att underlätta för uppvandrande fisk (Malm-Renöfält *et al.* 2015).

Men det finns en fara i att det uppstår problem i driften hos vattenkraftverket så att flödet till turbinerna stängs av. Då släpps plötsligt allt vatten på i fåran, vilket orsakar översvämning. Det återskapade strömekosystemet spolats bort av för mycket vatten eller omvänt om flödet i fåran pga. tekniska problem uteblir uppstår lätt en syrefattig miljö i de pölar av vatten som blir kvar i torrfåran vilket snabbt dödar de djur som blivit instängda (Sparrevik *et al.* 2011).

En annan nackdel är att minimiflöden påverkar på kraftstationens leverans av el. Den del av vattnet som bildar minimiflödet går inte genom turbinerna vilket medför årliga förluster för kraftverket. Förutom den ekonomiska aspekten handlar en annan punkt i diskussionen om vattenkraftens roll som reglerkraft. Vid hög efterfrågan på el står vattenkraften för stor del av regleringen i Sverige, därför är det viktigt att se vilka nackdelar de olika åtgärderna som minimitappning bär med sig (*ibid.*).

6.7.1.1 Ekologiska fördelar med minimiflöden

Minimitappning i naturfåror medför ökade **positiva effekter för fiskfaunan**. Flera studier tyder på att arter kan etablera sig vid minimitappning i en delvis torrlagd fåra och att även de befintliga arterna tillväxer i populationsstorlek. I en av studierna var det en torrfåra som för första gången på 50 år började tappas med vatten och resultatet blev att tätheten av öring ökade med 40 % de fem första åren (Malm-Renöfält *et al.* 2015). Åtgärden med minimitappning medförde även ökning i täthet

för andra organismer som akvatiska **mossor** och **alger**. På ställen med små variationer i flödet kunde fler arter etablera sig och växa i population. Men i jämförelse med ett referensvattendrag kunde det konstateras att det artificiella vattendraget inte hade samma positiva effekt på biodiversitet och tätheter av fisk. Dammen med vandringshindret fanns ju kvar (ibid). **Insekter** och **larver** av olika slag som är strandlevande påverkas negativt vid ett reglerat vattendrag. Eftersom dessa är vattenlevande under delar av sin livscykel medför det positiva effekter även för dem med ett återskapat flöde (ibid). Fisk gynnas också av större mängd insekter och larver i återskapade vattendrag eftersom dessa utgör en stor del av deras föda. Tätheten av **fåglar** är också lägre nära vattendrag som är torrlagda större delen av året. En minimitappning som medför en ökning av insekter ger då lokalt mer tillgång på föda för fåglar (ibid).

6.8 Problematik när vattenkraft konkurrerar med matproduktion

Traditionella vattenkraftverk innebär en fördämning av ett vattendrag. Detta påverkar vattendragets ekosystem och en del som drabbas hårt är vandrande fiskarter. För fisken blir dammen ett vandringshinder och trots att åtgärder gjorts för att installera vandringsvägar förbi verken så är det ett faktum att fiskbestånden i dessa områden minskar (Näslund *et al.* 2013).

Tunde skriver, i rapporten *Small hydro schemes - taking Nigeria's energy generation to the next level* (2005), att fiskerinäringen minskade avsevärt vid tre olika vattendrag där dammar anlagts i samband med utbyggnad av vattenkraft. På platser där fisk är en betydande andel av befolkningens kost får detta konsekvenser. Ett exempel är en av Asiens största floder som heter Mekong. Människorna kring denna flod uppskattas ha ett proteinintag som till ca 50-70 % består av lokalt fångad fisk. Totalt beräknas 90 miljoner människor vara beroende av flodens fisk och dess andra resurser (Baran & Ratner 2007).

Genom ett minskat flöde av vatten nedströms vattenkraftsdammar får vissa områden problem att tillgodose bevattningsbehovet för jordbruk längs vattendraget. Speciellt mindre vattenkraftverk bidrar till detta problem då de är ineffektiva vid ett litet vattenflöde till kraftverket. Då väljs ofta att minska eller stänga av flödet från dammen ett tag för att sedan öka turbinernas effektivitet då dammen innehåller mer vatten vilket starkt påverkar hur mycket vatten som kan tas ut för bevattning nedströms dammen (Huang *et al.* 2011).

För att råda bot på minskad fiskproduktion i svenska älvar på grund av vattenkraft kompensationsodlas lax och öring. De släpps ut nedströms vissa kraftverksdammar långt ner i systemet som till exempel i Dalälvens nedre del vid Älvkarleby. Dessa odlingar ska kompensera bortfallet av lekområden och säkerställa en viss nivå av dessa arter i Östersjön. Tidigare har 84 älvar runt Östersjön haft naturliga laxpopulationer, nuförtiden är det bara 10 älvar har egna hållbara populationer av lax

(Palmé *et al.* 2012). Den odlade fisken har dock inte samma genetiska variation som den vilda vilket på sikt utarmar populationerna och gör dem känsliga för miljöförändringar. Fiskar man upp en kompensationsodlad lax eller öring ser man det på att den så kallade fettfenan långt bak på ryggen är avklippt. All kompensationsodlad fisk märks på detta sätt innan utsättning.

6.9 Koppling till svenska och globala mål

Som redogjorts i detta kapitel påverkar vattenkraften miljön - både i vatten och på land samt lokalt så väl som globalt. Dessa effekter kan kopplas till ett antal hållbarhetsmål som antagits av FN under namnet Agenda 2030. **Mål 15, Ekosystem och biologisk mångfald**, ”För ett hållbart nyttjande av landbaserade ekosystem, hållbart brukade skogar, bekämpa ökenspridning, hejda och vrida tillbaka markförstörelsen samt hejda förlusten av biologisk mångfald” (Svenska FN-förbundet 2018). Ett delmål inom mål 15 är att vidta åtgärder för att minska förstörelsen av naturliga livsmiljöer och hejda förlusten av biologisk mångfald, där vandringshindret dammen är starkt minskar antalet arter vilket presenterats i detta kapitel. Även det svenska miljömålet **Ett rikt växt och djurliv** motverkas ur denna aspekt.

Vidare diskuterades utsläpp av växthusgaser. Till detta kan ytterligare ett mål från Agenda 2030 anknytas, **mål 13** om att **bekämpa klimatförändringarna**. Utsläppen som en fördämning av ett vattendrag innebär är högre än de tidigare utsläppen från vattendraget.

Utlakningen av kvicksilver och dess omvandling till den organiska föreningen metylkvicksilver (som ackumuleras i de övre skikten av näringskedjan), delvis ett resultat av marköversvämning i samband med dammbyggen. Detta går emot Sveriges miljömål om en **giftfri miljö**. Speciellt preciseringen av målet som säger att ”Den sammanlagda exponeringen för kemiska ämnen via alla exponeringsvägar inte är skadlig för människor eller den biologiska mångfalden” uppnås inte ur den aspekten.

Ett av hållbarhetsmålen från agenda 2030 berörs av problemen som uppstår då vattenkraft konkurrerar med matproduktion. Detta **mål 2** heter **Ingen hunger** och syftar till att: ”avskaffa hunger, uppnå tryggad livsmedelsförsörjning samt främja ett hållbart jordbruk” (Svenska FN-förbundet 2018). Vattenkraften leder på ställen där lokalt producerad fisk är en stor andel av dieten för människor till hungersproblem med minskat fiske samt minskad möjlighet till bevattning av åkrar och blir därmed ett hinder för en stabil livsmedelsförsörjning i dessa områden.

Mål 7, Hållbar energi för alla: Potential för vattenkraft finns mer eller mindre överallt i hela världen, och en stor del av potentialen finns i Afrika, Asien och Sydamerika där befolkningen behöver el för att nå en bra standard. Därför skulle de flesta länder kunna utnyttja vattenkraft för att försörja befolkningen med hållbar energi.

Mål 6, Rent vatten och sanitet: Eftersom byggnaden av vattenkraftverk ofta görs i samband med en upprustning av vattensystemet i den närliggande trakten kan vattenkraft medföra att fler får tillgång till rent vatten.

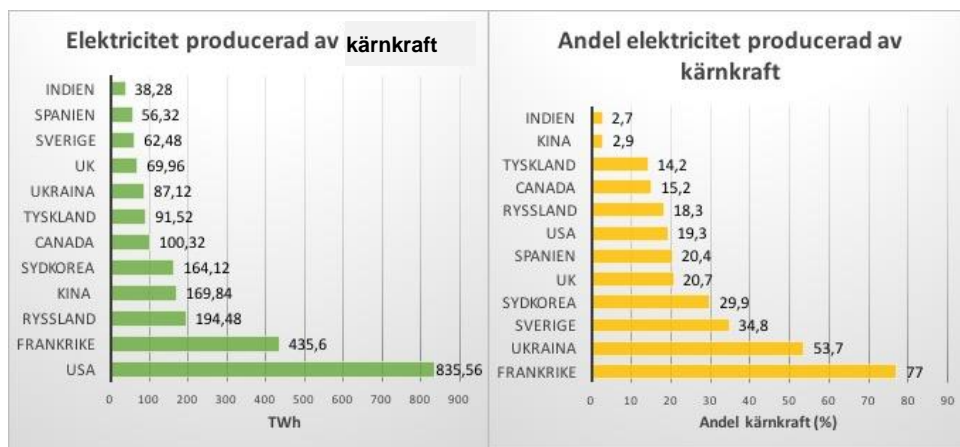
Det svenska miljömålet **Levande sjöar och vattendrag:** För att detta ska uppfyllas måste strandzonerna sluta förstöras och vattenkraften måste hitta åtgärder så att närings- och sedimenttransporten blir mer naturliga. Minimiflöde skulle ge en rad positiva ekologiska effekter samt öka den biologiska mångfalden för flora och fauna särskilt vid vattenkraftverk med torrfåror. Detta går att återkoppla till målet ”**Ett rikt växt- och djurliv**” som även det inte kommer att nås till 2020 enligt indikatorerna. Man behöver vidta omedelbara och betydande åtgärder för att minska förstörelsen av naturliga livsmiljöer, hejda förlusten av biologisk mångfald och skydda och förebygga utrotning av hotade arter. Det är tydligt att utbyggnaden av vattenkraft inte jobbar tillräckligt för **globala målet 15 Ekosystem och biologisk mångfald**. Arter som sötvattensdelfiner och störrar är idag i stort sätt utdöda på flera platser på grund av vattenkraften. Och barriäreffekterna påverkar den biologiska mångfalden negativt i många avseenden.

6.10 Instuderingsfrågor

- Vilket land producerar mest el från vattenkraft?
- En orsak till sedimentation är att strandzonerna är skadade vad är den andra orsaken?
- Nämn två anledningar till varför vegetation i strandzonen är viktig?
- Vilka typer av hot finns det mot fiskarna från vattenkraft?
- Varför blir flodpärlmusslan hotad av vattenkraftens barriäreffekter, trots att den inte är en vandrande art?
- Beskriv vilka nackdelar som finns för vattenkraftverksproduktion när minimiflöde används.
- Hur kan man återskapa ett flöde i en torrfåra? Nämn två ekologiska fördelar.

7 Kärnkraftens miljöpåverkan

Kärnkraft utgör ungefär 11 % av all producerad elektricitet och är det fjärde vanligaste sättet att tillverka el sett till hela världen (IEA 2018a). Den process man använder för att producera el i ett kärnkraftverk kallas fission vilket är atomklyvning. Denna process äger rum i en kärnreaktor fylld med vatten som värms upp och bildar ånga. Ångan driver sedan en turbin som med hjälp av en generator producerar el. År 2015 var antalet kommersiella kärnreaktorer anslutna till elnät 437 stycken globalt och de hade en total elektrisk effekt på 377 GW (NEA & IAEA 2016). USA var år 2015 det land som producerade mest elektricitet från kärnkraft (Figur 28), med en produktion på 836 TWh. Frankrike är det land som har störst andel av producerad av kärnkraft, 77 % kärnkraft i elmixen (Figur 28, IEA 2018b).



Figur 28. Till vänster visas elektricitet producerad av kärnkraft. Bearbetad data från BP (2017) och till höger visas andel elektricitet producerad av kärnkraft. Bearbetad data från IEA (2018).

7.1 Kärnbränsle

7.1.1 Uran

Grundämnet uran är det ämne som används som kärnbränsle i svenska reaktorer och är även det absolut vanligaste ämnet att använda som kärnbränsle världen över. Uran är ett metalliskt ämne och ett vanligt förekommande mineral som finns överallt på jorden - i jordskorpan, världshaven och jordens inre. Medelhalten av uran i jordskorpan är ungefär 2-3 gram per ton och för ytvatten 0,01 mikrogram per liter (SGU uå). Uran består av flera isotoper där bara en del är radioaktiva. Uran-238 som till ca 99 % dominerar den naturliga sammansättningen är inte radioaktiv. I berggrunden är därför uran bara svagt radioaktivt. För att uran ska vara intressant som kärnbränsle behöver det anrikas så att de radioaktiva isotoperna får tillräckligt hög koncentration. I anrikningsprocessen ökar man uran-235 från den naturliga halten på 0,7 % till en halt på mellan 3 och 5 % i en svår och energikrävande process (Strålsäkerhetsmyndigheten 2017d). När uran-235 i reaktorn sedan utsätts för neutroner i hög hastighet startas en kedjereaktion av kärnklyvningsprocesser som

avger värme. Sådan kärnklyvning kallas fission och är den process kärnkraftverk använder för att producera energi. Eftersom inte uran nybildas räknas kärnkraft inte till förnybara energislag.

7.1.2 Torium

Ett alternativt kärnbränsle till uran är torium (Th). Torium är naturligt förekommande i större utsträckning än uran. Ämnet är mycket svårslösligt vilket leder till att det inte har någon biologisk funktion. Naturligt torium består nästan helt och hållet av isotopen torium-233. Denna isotop är inte fissil (klyvbar med förmåga att upprätthålla en nukleär kedjereaktion) men kan användas för att skapa material som är klyvbara. I reaktorn absorberar torium-233 neutroner och omvandlas till uran-233 som går att använda som kärnbränsle precis som uran-235 (WNA 2017). Saltsmältreaktorer är en reaktortyp som är välanpassad för torium som kärnbränsle. I dagsläget används inte torium i någon större utsträckning. De flesta projekt med torium som bränsle lades ned på 1980-talet. Anledningen till detta är att torium inte var ekonomiskt konkurrenskraftig med uran, det fanns inget politiskt stöd för utveckling av denna typ av kärnteknik med en ökad global medvetenhet för spridningsrisken av kärnavfall (Thorium Report Committee 2008).

7.1.3 Utvinning av uran

7.1.3.1 Uranbrytning

Vid brytning av uran används främst tre olika metoder - dagbrott (14 %), underjordsgruvor (27 %) och in-situ lakning, ISL (51 %, NEA & IAEA 2016). Brytning i dagbrott sker när malmen finns tillgänglig ytligt och har relativt låg halt av uran men finns i stora mängder. Underjordsbrytning är dyrare vilket leder till att uranhaltarna måste vara högre för att det ska vara lönsamt. In-situ lakning görs genom att pumpa ned en lösningsvätska i uranmalmen i vilken uranet löser sig i för att sedan pumpa upp vätskan igen för att utvinna uranet ur vätskan. Man kan säga att man lakar ur uranet direkt i berggrunden. Vätskan består av syra eller alkaliska lösningar. ISL har blivit ett viktigt sätt att bryta uranet på. Uran produceras även som biprodukt vid brytning av andra mineraler, vilket utgör en liten andel av det brutna uranet.

Efter brytning av uranmalmen krävs flera steg av ytterligare behandling för att kunna använda uranet, och då speciellt isotopen U-235. Malmen mals ner och genom kemiska processer av olika slag får man fram ett urankoncentrat, en blandning av olika uranoxider, som ser ut som ett gult pulver och kallas för yellowcake. Det är som yellowcake uranet säljs från gruvorna. Innan urankoncentratet kan användas som kärnbränsle konverteras det till uranhexafluorid för att sedan kunna anrikas. Efter anrikning en är det urandioxid som pressas ihop till små svarta bränslekutsar. Dessa kutsar staplas sedan på varandra i långa rör vilket utgör det slutgiltiga bränsleelementen som används i reaktorn. Var uranbrytningen och anrikningen sker spe-

lar roll för miljöpåverkan då de länder som hanterar uranet har olika miljölagstiftning. Brytning, anrikning och tillverkningen av uranbränslet står för ungefär 70 % av de totala utsläppen av växthusgaser från kärnkraften (OKG 2017).

7.1.3.2 *Hälsorisker vid uranbrytning*

Alla på jorden mottar hela tiden en liten mängd bakgrundsstrålning från naturliga källor. Uranbrytning ökar inte denna bakgrundsstrålning märkbart för allmänheten eller för människor och djur som bor befinner sig nära gruvorna. Den genomsnittliga dosen strålning en urangruvarbetare utsätts för är väl under gränsen för vad som anses farligt. Förutom risken för strålning skiljer sig inte arbetshälsan och säkerhetsriskerna vid modern uranbrytning från liknande gruvoperationer för andra metaller (WNA 2018). De flesta länder där uranbrytning sker har helt antagit de internationella rekommendationer som satts upp, dock finns det delar av världen som inte har det. De hälsorisker som finns i samband med uranbrytning är: inandning av radioaktivt damm, direkt strålningsexponering, exponering för radongas från berget (radon avger alfapartiklar som kan ge upphov till lungcancer) och hantering av uranoxidkoncentrat (har en kemisk toxicitet).

7.1.3.3 *Miljöeffekter vid uranbrytning*

Landskapspåverkan är en av gruvbrytningens tydligare miljöeffekter. Bergmaterial måste brytas för att komma åt malmfyndigheten. Brytning genom dagbrott ger upphov till störst landskapspåverkan då stora mängder bergmaterial flyttas. Uranbrytning skiljer sig inte nämnvärt från annan typ av gruvverksamhet när det kommer till detta.

Avfall vid brytning. Det är främst två olika sorters avfall som skapas vid traditionell brytning - gråbergsavfall och lakrester (SGU 2016). Med traditionell brytning syftar man på brytning i dagbrott och underjordsgruvor. Det bergmaterial som bryts för att göra malmen åtkomlig kallas gråberg. Hur gråberget hanteras, hur stor mängd som bryts och dess sammansättning är faktorer som påverkar miljöeffekterna av uranbrytningen. Oftast bryts större mängder gråberg vid dagbrott än underjordsgruvor. Gråberg med höga halter hälso- och miljöfarliga ämnen, till exempel bly och uran, kan behöva åtgärdas om halterna är riktigt höga. Detta farliga material kan placeras i deponier för att förhindra miljöpåverkan. Rent gråberg som har låga halter farliga ämnen är relativt oproblematiskt och kan användas som täckning av problematiskt gråberg eller som fyllning av avvecklat gruvområde (SGU 2016).

Den brutna malmen genomgår olika behandlingar för att utvinna uranet och den metod som vanligen används är lakning. Beroende på sammansättningen i uranmalmen sker lakningen med syror eller alkalilösningar (SGU 2016). Det som blir över efter lakningen kallas lakrester, eller anrikningssand, och innehåller det uran som inte går att utvinna samt andra ämnen som på olika sätt kan vara farliga.

Speciellt för uranmalm är att den innehåller förhöjda halter av sönderfallsprodukter som torium, radium och polonium vilket kan öka risken att radioaktiva ämnen

sprids. Ungefär 85 % av radioaktiviteten i malmen blir kvar i anrikningssanden både från uran som inte separerats och från andra radioaktiva ämnen som radium och torium (SGU 2016). Andra farliga ämnen som kan finnas i anrikningssand vid gruvdrift är tungmetaller som till exempel bly, kadmium och arsenik. Den farliga anrikningssanden förs sedan till avfallslagring som oftast sker i sandmagasin vilka täcks med vatten för att motverka damning och vittring (SGU 2016).

Avfall från in-situ-lakning. Denna typ av uranbrytning skiljer sig från de andra två när det gäller avfall. Eftersom lakningen sker direkt i berggrunden lämnar det inte efter sig anrikningssand. Risker som finns med denna metod är att lakningslösningen kan förorena grundvattnet om de geologiska förhållandena är olämpliga för denna typ av brytning. Påverkan på grundvattnet är avsevärt större vid in-situ-lakning än vid dagbrott och vanliga underjordsgruvor (SGU 2016).

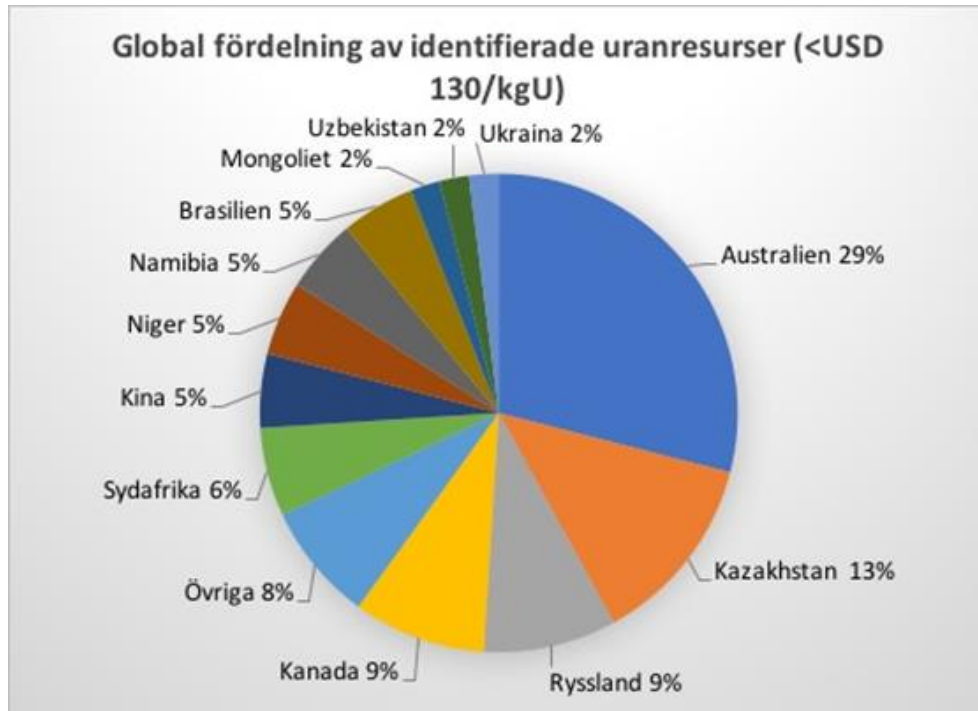
7.1.4 Råvarutillgång

7.1.4.1 Uran i världen

Den årliga produktionen av uran från gruvor (primär produktion) uppgick år 2014 till 55 975 ton uran och tillhandahöll 99 % av efterfrågan för världens reaktorer (NEA & IAEA 2016). Resterande uran levererades från sekundära källor vilket innefattar överskott från statliga och kommersiella lager (från nedrustningen av kärnvapen), återanvändning av använt kärnbränsle och utarmat uran som blivit återanrikat.

Storleken av de totala identifierade tillgångarna av uran var 5,7 miljoner ton år 2014 (i priskategorin <USD 130/kg U) och med samma årliga konsumtion på ungefär 56 600 ton skulle dessa tillgångar räcka i drygt hundra år till. Dock förväntas kärnkraftskapaciteten i världen växa med minst 11 % till år 2035 vilket gör att den årliga efterfrågan av uran skulle stiga till 67 000 ton (NEA & IAEA 2016).

Australien är det land som dominerar världens urantillgångar med 29 % av de identifierade resurserna. Utöver Australien är de länder som har stora tillgångar av uran i priskategorin <USD 130/kg U Kazakstan, Ryssland, Kanada och Sydafrika (Figur 29). Det land med störst produktion av uran var år 2014 Kazakstan (41 %) vilken var större än både Australiens (9%) och Kanadas (16%) sammanlagda produktion (NEA & IAEA 2016). All uranbrytning i Kazakstan gjordes med in-situ lakning. I Kanada används främst underjordsgruvor och i Australien finns inget dominerande sätt att bryta uran.



Figur 29. Fördelning av identifierade uranresurser. Bearbetad data från NEA & IAEA (2016).

7.1.4.2 Uran i Sverige

Sveriges årliga konsumtion av uran uppgick till 1500 - 1900 ton uran år 2014 och kommer ursprungligen från främst Kanada, Australien, Ryssland, Namibia och Kazakstan. Anrikningstjänsterna köps från Ryssland, Frankrike, Storbritannien och Nederländerna och det färdiga kärnbränslet köps från Sverige och Spanien (SGU 2016).

Den största rapporterade tillgången av uran i form av svartskiffer, som är en sorts alunskiffer, finns i Sverige och uppgår till över 2,5 miljoner ton uran. Dessa urantillgångar räknas till de okonventionella vilket innebär att de inte är lönsamma då de kostar väldigt mycket att utvinna, mellan USD 130-260 per kilo uran (SGU 2016). Sveriges urantillgångar utgör ungefär 0,2 % av världens urantillgångar och 27 % av Europas (SGU uå). Sverige har för närvarande ingen egen utvinning eller produktion av uran då det varken är lagligt att prospektera eller bryta uran. Detta till följd av påtryckningar från kommuner. Det fanns dock planer under 1950-talet, när Sverige började bygga ut kärnkraften, på att utvinna och producera det egna uranet. Historiskt sett har uranbrytning i Sverige främst skett i en uranfyndighet i Ranstad, som ligger i Skövde kommun, där tillgången på uran uppgår till 1,7 miljoner ton (SGU 2016). Denna fyndighet ligger i bergartsformationen Billingen och består av stora mängder alunskiffer som har en låg uranhalt.

7.2 Transporter kopplade till kärnkraft

7.2.1 Det svenska systemet

I samband med elproduktion från kärnkraftreaktorer krävs transporter av både bränsle och radioaktivt avfall. Alla svenska kärnkraftverk ligger längs kusten och är försedda med hamnar. Därför sker den största delen av transporterna sjövägen.

Det radioaktiva avfallet består av det använda bränslet samt medel- och lågaktivt avfall. För transporter av detta avfall används ett specialbyggt fartyg, M/S Sigrid. Fartyget spelar en central roll i det svenska systemet för hantering av radioaktivt avfall. Det utför transporter mellan kärnkraftverken och de gemensamma anläggningarna för hantering av radioaktivt avfall. Det svenska systemet illustreras i Figur 30. En av dessa är anläggningen för mellanlagring i Oskarshamn. Låg- och medelaktivt avfall transporteras till slutförvaret för kortlivat avfall, SFR, i Forsmark (Björklund 2018). I ett framtida skede krävs även transport av bränslet från mellanlagringen till slutförvar som planeras byggas i Forsmark (SKB 2016b).

Transporterna av det använda kärnbränslet utgör en stor del av alla transporter som är relaterade med kärnkraft. Detta eftersom det fraktas i avskärmande behållare med stor vikt. Transporterna genererar utsläpp av växthusgaser men de är förhållandevis en mycket liten del av de totala utsläpp som genereras vid elproduktion med kärnkraftverk.

Det radioaktiva avfallet innebär att det finns en ständig risk för läckage av radioaktiva ämnen. När avfallet, och då framförallt det använda kärnbränslet, fraktas mellan anläggningarna längs de svenska kusterna utgör det en miljörisk.

Det använda kärnbränslet är starkt radioaktivt och utsänder kraftig gamma- och neutronstrålning. Om en olycka med fartyget inträffar eller om ett läckage uppstår skulle de radioaktiva ämnena kunna förorena miljön. Därför finns det regler och lagar som reglerar hur transporterna får ske. Mer om konsekvenserna vid olyckor går att läsa i avsnitt 7.7.



Figur 30. Det svenska systemet för hantering av radioaktivt avfall från kärnkraft. Illustration: Anton Thorstensson.

7.2.2 Regler och risker för transportererna

Internationella atomenergiorganet, IAEA, utfärdar förordningar om hur transportererna ska gå till. Den grundläggande principen är att radioaktivt material som transporteras bör packas tillräckligt för att skydda omgivningen från materialet vid eventuella tillbud eller olyckor. Det främsta målet är att skydda människor, egendom och miljö mot de direkta och indirekta effekterna av strålning och radioaktiva ämnen. De senaste 50 åren har det inte skett någon transportolycka som har orsakat nämnbar skada på människor eller miljön (WNTI 2018).

Risken för stöld av radioaktivt material och sabotage av transport eller anläggning som hanterar radioaktivt material behöver vägas in i en bedömning av miljöpåverkan eftersom det inte går att bortse från att en aktion kan ske. Trots den låga risken

och faktumet att det inte hänt tills nu så skulle konsekvenserna på miljön av en sådan aktion kunna bli enorma.

Valet att deponera det använda kärnbränslet istället för att upparbeta det, minskar behovet av transporter och minskar exponeringen för de små men ändå existerande risker som transporter innebär. Å andra sidan blir mängden bränsle som behöver slutförvaras större (Andersson *et al.* 2013).

7.3 Miljöeffekter vid drift - kylvatten

För att producera elektricitet från kärnkraft krävs oftast en betydande mängd vatten för kylning. Olika typer av kylningsmetoder kan dock nyttja vatten på varierande sätt. Kärnkraftverk med tryckkokar- och kokvattenreaktorer, har båda vatten som huvudsakligt kylmedium (World Nuclear Association 2022). Vad som skiljer konsumtionen av vatten åt är hur de olika kärnkraftverken är designade att cirkulera kylvattnet. När ett kärnkraftverk är designat med cirkulation av kylvatten kommer andelen vatten som evaporerar till atmosfären att vara större gentemot de som bara är icke-cirkulerande. Metoden att cirkulera kylvatten ger dock valmöjligheter att bestämma den utmynnande temperaturen av vattnet på ett annat sätt än vid icke-cirkulerande eftersom denna är mindre bunden till vattnets flödes hastighet. Det stora användandet av vatten ger konsekvenser beroende på var kärnverksamheten befinner sig, historiskt sätt har därför olika kyltekniker använts på olika platser.

7.3.1 Exemplet Frankrike - kärnkraftverk vid floder

Frankrike har 18 kärnkraftverk (56 reaktorer) och bara 5 av verken ligger vid kusten. De som ligger vid floder är känsliga för varma temperaturer på flodvattnet samt för lågt flöde vid torka. Enligt den internationella statistiska databasen Eurostat nyttjade Frankrike 28.3 km³ vatten inrikes år 2010. Av detta var 22 km³ enbart för termoelektrisk produktion. Det är alltså en betydande del som går till kylning för elproduktion i Frankrike. Kärnkraftsverksamheten i Frankrike följer regler för ut- och ingående kylvattentemperaturer. Utmynnande kylvattentemperaturer ovanför 28 grader tolereras nästan aldrig då vattenlevande organismer blir värmestressade. Varmt väder har vid flera tillfällen resulterat i produktionsavbrott för el i landet. En konsekvens av detta har varit kraftiga prishöjningar på elektricitet. I Frankrike ger det varmare klimatet upphov till höga temperaturer på ingående kylvatten. Detta gör att kärnkraftverk förutspås få fler avbrott i sin elproduktion i framtiden (Sesma 2016). Analyser har konstaterat att kommande temperaturökningar kan minska den nationella produktionen. Av de olika kylningsteknikerna som används, icke-cirkulerande samt cirkulerande vatten kommer den icke-cirkulerande kylningssmetoden att resultera i flest dagar med produktionsförluster. Prognoser är dock entydiga i att produktionsförluster kommer påverka båda typer av kylningsmetoder och vara till besvär för kraftproduktionen framöver (van Vliet 2012).

7.3.2 Exemplet Sverige - Kärnkraftverk vid kusten

Sverige, som använder en icke-cirkulerande kylningsmetod på samtliga kärnkraftverk är inte lika känsliga för varmt och torrt väder som Frankrike. Istället för att ha våra kärnkraftverk försedda med kylvatten från floder ligger alla tre verksamma kärnkraftsanläggningar i direkt anknytning till havet. Tillfällen där temperaturen vid inloppet överstiger vad som är tillåtet (ofta 27 grader) är få och andelen kärnkraftsproducerad elektricitet i elmixen är lägre nationellt vilket minskar risken för påverkan i nationell skala (Rademaekers 2011). Vid ett fåtal tillfällen har dock vattentemperaturen gjort att produktionen stängts ned, om än bara på enskilda reaktorer. Senaste fallet av detta var 31 juli 2018 för reaktorn Ringhals 2 på kärnkraftverket i Ringhals (Berntsson 2018).

7.3.2.1 Forsmark

Förutom att temperaturhöjningar har en förmåga att begränsa ett kärnkraftverks verkningsgrad kan det påverka vattenmiljöns biologiska mångfald. I Sverige har ett långvarigt projekt att kartlägga förändringar vid kärnkraftverks vattenmyningar bedrivits vid kärnkraftverket Forsmark. För två av de tre aktiva reaktorerna vid Forsmark strömmar kylvattnet igenom en sluten bassäng på $2,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (motsvarande 920 st. olympiska bassänger). Bassängen har agerat utrymme för forskning sedan 1980 och många olika tester har genomförts. 1991 kunde en forskargrupp som genomfört studier av biotestsjön konstatera att den totala biomassan i sjön under de första sex åren minskat till att vara knappt 40 % av den ursprungliga. De kunde också se en tydlig trend hur fisk som föredrog varmare vatten fick en ökad andel i sjön. Orsaker till populationsförändringar konstateras att vara vattenströmningens temperatur, ljusinsläpp och vågsvall (Svensson 1991). Den särskilda vattenmiljön har också påverkat fågellivet kring av biotestsjön. Exempelvis har avsaknaden av is under vinterhalvåret underlättat för sjöfågel att jaga fisk, något som i sin tur gynnar den nära hotade havsörnen som samlas där vintertid för födosök (Ehlin *et al.* 2009).

7.4 Slutförvar

7.4.1 Deponering

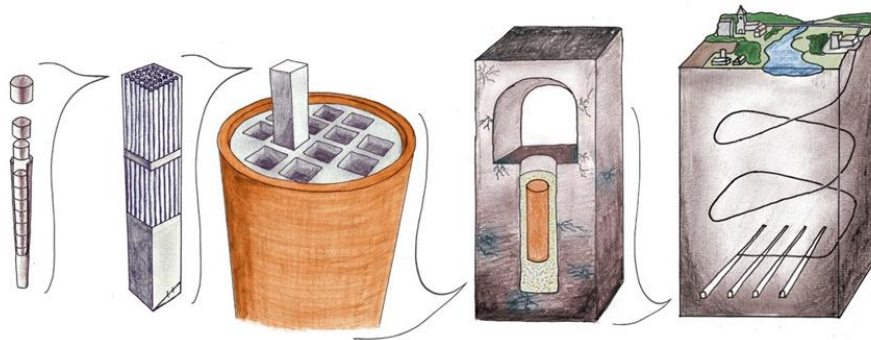
Slutförvar är ett finare ord för en deponi av radioaktivt avfall och ett sätt att hantera avfall från kärnkraftverk. Det innebär att det radioaktiva avfallet skiljs från geosfären genom att placeras i en geologisk formation. I Sverige kommer slutförvaret ske i urberget enligt nuvarande förslag. Geologiska formationer används för de anses kunna vara stabila under en så lång tidsperiod som avfallet behöver vara avskilt. Andra länder har eller planerar slutförvar i vulkaniska- och sedimentära bergarter samt i saltgruvor (IAEA 2001).

I Finland har ett slutförvar godkänts av regeringen. Det ska börja byggas runt år 2023 med samma metod som utvecklats och planeras att byggas i Sverige. Finland

blir det första landet i världen som inleder arbetet med att deponera använt kärnbränsle i berggrunden (Svens 2015).

7.4.2 Slutförvar

Slutförvaret som planeras och utvecklas av företaget Svensk kärnbränslehantering, SKB, kallas KBS-metoden som står för kärnbränslesäkerhet. Forskning kring metoden har pågått i över 30 år. År 2009 valdes platsen för slutförvaret till Forsmark, bland annat på grund av låg förekomst av sprickor i berggrunden (SKB 2016c). Det använda bränslet planeras att deponeras på 500 meters djup nere i urberget i inkapslade i stål och koppar, och slutligen täckta av bentonitlera. SKB som ägs av kärnkraftverksbolagen tillsammans driver sedan år 2011 en process för att få tillstånd att börja bygga slutförvaret. Kritiker hävdar att SKB, som själva har fått fördela forskningsanslagen för slutförvaringstekniken, har valt allt för lojala och okritiska forskargrupper (Joelsson 2012).



Figur 31. Principskiss över slutförvar enligt KBS 3-metoden. Från vänster: bränslestav med urankutsar, bränsleknippe, kopparkapsel med använt bränsleknippe, berggrum med placering av kapsel i lera och berggrummet. Illustration: Anton Thorstensson.

Använt kärnbränsle måste slutförvaras i upp till 100 000 år. Det som måste förhindras är att levande varelser i framtiden får i sig ämnen från bränslet via mat, dryck eller inandning. Det enda som skulle kunna transportera radioaktiva ämnen från förvaret är grundvattnet (Energiföretagen 2017).

Metoden KBS 3 är enligt SKB uppbyggd på tre barriärer som ska hindra spridningen till grundvattnet (Figur 31). Den första är en kapsel av koppar och stål. I den 5 meter långa och 25 ton tunga kapseln placeras 12 bränsleelement i en insats av stål som gör kapseln stark. Stålkärnan är omgiven av en 5 cm tjock kopparmantel. I bergets kemiska miljö korroderar koppar mycket långsamt (Energiföretagen 2017). Den täta kapseln ska hindra att radioaktiva ämnen läcker ut och håller enligt SKB i 100 000 år (King *et al.* 2001). Forskare från KTH hävdade 2007 att SKB:s antagande om att kopparkapseln tål vatten och att dess beräknade korrosionstakt inte är bevisad (Szakalos *et al.* 2007). De visar i sina experiment att den anaeroba korrosionen är flera storleksordningar större än vad SKB räknat med. Därav drar de slutsatsen att kapslarna kan kollapsa efter bara 1000 år. På grund av detta startade

SKB två forskargrupper som motbevisade att koppar korroderar i rent syrgasfritt vatten (SKB 2014).

Den andra barriären är bentonitlera. Leran är en buffert som skyddar kapseln mot rörelser i berget. Leran ska också hindra vatten att strömma runt kapseln och fungerar som ett filter som med sina små partiklar binder läckande ämnen om en kapsel skulle skadas. Leran expanderar om den kommer i kontakt med vatten men eftersom lagringsplatsen är försluten kan leran inte utvidgas. Det skapas istället ett högt tryck i leran som gör den mycket tät och på så sätt hindrar vatten att ta sig fram till kapseln (SKB 2007).

Den tredje barriären är det redan nämnda urberget. Berget fungerar som ett filter. Berget kan hålla kvar radioaktiva ämnen så länge att en stor del hinner sönderfalla till stabila grundämnen innan de eventuellt når markytan. Bergets mineraler kan genom att binda till de läckta ämnena sänka transporthastigheten av dessa.

7.4.2.1 Radioaktivt avfall

Det radioaktiva avfallet från kärnkraften kan kategoriseras efter olika intensitet och livslängd. Det delas in i hög-, medel- och lågaktivt avfall respektive kort- och långlivat avfall. Det medel- och lågaktiva avfallet utgörs av använd skyddsutrustning och driftavfall så som filter och reningsvätskor. Större delen av det lågaktiva avfallet eldas upp i en speciell ugn där askan och rökgasfilter tas om hand som medelaktivt avfall (Energiföretagen 2017). Både det medel- och lågaktiva avfallet deponeras i slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall 50 meter ner i berggrunden utanför Forsmark (SKB 2017).

7.4.2.2 Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet är både högaktivt och långlivat och är därmed det som behöver avskiljas från geosfären längst tid och med störst säkerhetsåtgärder. Bränsleelementen byts ut efter tre år i en tryckvattenreaktor och efter fem år i en kokvattenreaktor. Bytena sker årsvis genom att en femtedel respektive en tredjedel av bränslet byts ut (Strålsäkerhetsmyndigheten 2017a). En svensk kärnreaktor producerar mellan 15 och 25 ton radioaktivt avfall per år (SKB 2016a).

Strålningen och värmeutvecklingen är som störst då bränslet tas upp ur reaktorn. Inledningsvis förvaras det använda kärnbränslet i reaktorhallens egna bränslebassänger. Det fortsatta radioaktiva sönderfallet skapar värme som kallas resteffekt och kan uppgå till 7 % av bränslets effekt vid normal drift. Därför behöver det fortsatt aktiv kylning, alltså kylning utan energiutvinning.

Efter att ha förvarats i reaktorhallens bassäng i minst nio månader transporteras det sedan till förvaringsbassängerna på mellanlagringsanläggningen i Oskarshamn. Där planeras bränslet vara i 30-40 år (OKG 2017). Idag finns det 6 500 ton använt kärnbränsle i anläggningen (SKB 2016a).

Efter en tid producerar bränslet mindre värme och avger svagare strålning. Eftersom det då främst innehåller långlivade radioaktiva ämnen avtar radioaktivitet sedan mycket långsamt. En liten del av aktiviteten finns fortfarande kvar efter tiotusentals år. Under mellanlagringen minskar radioaktiviteten med 90 %, och därefter är det lättare att hantera (Energiföretagen 2017).

7.4.3 Koldioxidutsläpp

Livscykelanalyser som har gjorts visar att kärnkraften i jämförelse med andra kraftslag kan vara att föredra om man vill uppnå låga utsläpp av koldioxid, partiklar och försurande substanser. Koldioxidutsläppen från kärnkraft har beräknats av många olika aktörer. Resultatet varierar både beroende på metod och var studien är utförd. Spannet är mellan 2-59 g CO₂ ekv/kWh, där uppgiften om 16 g CO₂ ekv/kWh kan anses mest vedertagen (Moomaw *et al.* 2011). Det är i samma storleksordning som många förnyelsebara energikällor. Hanteringen av radioaktivt avfall och deponering utgör ungefär 10 % av de totala utsläppen av växthusgaser från kärnkraft (OKG 2017).

7.4.4 Risker

Miljöpåverkan från hantering och deponering av det använda kärnbränslet, utöver dess växthusgasutsläpp, är svår att uttrycka i annat än uppskattningar av sannolikheter för att slutförvaring inte håller avfallet avskilt tillräckligt länge. De anses vara förhållandevis små risker men med stora konsekvenser. De 100 000 år som bränslet behöver förvaras kan jämföras med att det den senaste istiden, som fortfarande påverkar genom landhöjning och format våra jordarter, slutade för bara ca 10 000 år sedan (SGU 2018) eller att de egyptiska pyramiderna byggdes för ca 4 000 år sedan (Joelsson 2012). En utmaning för slutförvaret är att föra vidare informationen om det till kommande generationer (SKB 2008).

7.4.5 Alternativa metoder för kärnavfall

Att deponera det radioaktiva avfallet i berggrunden är inte det enda alternativet. Andra länder har istället valt att upparbeta det använda kärnbränslet. Detta görs genom att separera det som kan användas som bränsle på nytt från det som inte går att använda. Det är plutonium och uran som renas från övriga klyvningsprodukter. Det återvunna plutoniumet återanvänds som en urandioxid-plutoniumdioxid-blandning, så kallat *mixed oxide fuel*, MOX-bränsle. Det återvunna uranet kan ytterligare anrikas och återanvändas direkt eller först blandas samman med höganrikat uran. När utbränt bränsle används för att tillverka nytt bränsle kallas det slutna bränslecykel. Detta trots att det inte är en helt sluten cykel utan bara till viss del (Strålsäkerhetsmyndigheten 2017). Denna process minskar mängden avfall men ökar behovet av transporter av det använda bränslet (SKB 2016b). Svenska kärnkraftverk har använt återvunnet uran, men det har upparbetats utomlands (Strålsäkerhetsmyndigheten 2017).

7.5 Olyckor vid kärnkraftverk

Under kärnkraftens verkningstid har det skett en del olyckor och allvarligare incidenter. I Tabell 11 räknas de större olyckorna upp översiktligt tillsammans med konsekvenserna (Strålsäkerhetsmyndigheten 2017b, Wall uå).

Tabell 11. Sammanfattning över kärnkraftsrelaterade olyckor. *INES-skalan förklarar innebörden av strålningsrelaterade olyckor med en stigande skala 1-7, där allvarligheten i olyckan ökar med ca 10 gånger per steg. Källor: Strålsäkerhetsmyndigheten 2017c, Sremc 2018.

Olycka	Årtal och land	INES-skalan*	Utsläpp	Konsekvenser
Kyshtym	1957, Ryssland	6	Radioaktiva joner av cerium 144, zirkonium 95 spreds	Den kemiska explosion som skedda bidrog till spridning av radioaktivt avfall och gjorde tusentals människor hemlösa
Windscale	1957, England	5	Brand med radioaktivt stoft i form av rök.	Flera rapporterade fall av cancer och förorenade livsmedel
Harrisburg	1979, USA	5	Radioaktiva ädelgaser med begränsade stråldoser till omgivningen	Förändrade synen på haverier och skapade högre krav på kärnkraftverk runt om i världen
Tjernobyl	1986, Ukraina	7	Radioaktiva ädelgaser, cesium-137, strontium-90, plutonium-239, jod-131	Obeboeligt i närområdet, kontaminerad mark, luft och mat i flertalet europeiska länder. Cancer och direkta dödsfall.
Fukushima	2011, Japan	7	Radioaktiv vätgas och vatten, cesium-137	Obeboeliga och kontaminerade mark- och vattenområden där jordbruk och fiske blev förstört. Dödsfall, cancer och en förändrad inställning till kärnkraft i Japan och världen.

7.5.1 Fukushima-olyckan

Den 11 mars 2011 skedde en av de mest allvarliga kärnkraftsolyckorna i modern tid i Fukushima daiichi i Japan. Kärnkraftverket ägdes av Japanska elbolaget Tepaco och var ett av Japans då 19 verk med totalt sex reaktorer. Även om kärnkraftverket var över 40 år gammalt så sågs det som ett av världens säkraste (D'Emilia 2015).

7.5.1.1 Händelseförlopp

Olyckan i Fukushima orsakades av jordbävning som var så kraftig att den slog ut kärnkraftverket från elnätet och som följd av detta stängdes fem av sex reaktorer ner (Tepco 2011). En knapp timme senare slog en sju meter hög tsunamivåg till och fyllde hela verket med vatten vilket skadade reservgeneratorerna, slog ut nød-

kylningen och gjorde hela kärnkraftverket strömlöst (D'Emilia 2015). Det blev tydligt att olyckan var omfattande då det fanns ett starkt övertryck inne i reaktorkärlet (Tepco 2011). Övertrycket berodde på radioaktiv vätgas som skapats till följd av reaktioner med bränslekapselns zinklegering ihop med värme och vatten, vilket var en stark indikator på att en härdsmläta skett (Karlsson & Säljö 2014). Försök till att nödventilera reaktorn gjordes, men eftersom verket ännu var strömlöst behövdes ventilerings ske manuellt. Vid denna tid började man evakuera människor inom en 3 km radie från anläggningen och boende inom 10 km avstånd uppmanades att stanna inomhus (D'Emilia 2015).

Morgonen efter togs beslutet att nödventilera genom att släppa ut den radioaktiva vätgasen för att sänka reaktortankstrycket. Trots detta sprängdes reaktorhallen i en kraftig vätgasexplosion som blåste bort taket på hela reaktorbyggnad 1 (D'Emilia, 2015). Först på kvällen började man kyla reaktorn med havsvatten eftersom restvärmen i reaktorn var mycket hög. Denna fördröjning orsakade en härdsmläta där härden smälte igenom den första skyddsbarriären bestående av en reaktoromslutande järnkapsel (Tepco 2011). Anledningen till att denna åtgärd hade dröjt var för att man inte ville skada de dyrbara reaktorerna med saltvatten (D'Emilia 2015).

På dag fem efter olyckan lämnades ett team på 50 arbetare att hantera situationen och fortsätta med kylningsarbetet. I reaktor 4 hade då bränslebassängerna börjat torrkoka och militär sattes in för att vattenbomba med helikopter. Eftersom bränslestavarna var i kontakt med luften, där det inte finns något skydd mot fortsatt sönderfall i stavarna, blev helikoptrarna utsatta för stark strålning. Det gjorde det ohållbart och man övergick till att använda vattenkanoner riktade mot reaktorn istället (D'Emilia 2015). I slutet av mars ansågs läget var stabiliserat och man ersatte havsvattnet med att kyla med destillerat vatten istället. Olyckan skulle komma att klassas på nivå 7, vilket är den högsta nivån, på INES-skalan (D'Emilia 2015).

7.5.1.2 Utsläpp

Utöver radioaktiv vätgas från härdsmlätan spreds även radioaktivt cesium (Cs-134 och Cs-137) vid vätgasexplosionerna och mängden som spreds motsvarade över 100 gånger så mycket utsläpp som vid bomberna i Hiroshima (Tepco 2011).

7.5.1.3 Korttidseffekter

Som följd av olyckan tvingades alla människor på ett avstånd om 20 km från kärnkraftverket evakuera på grund av riskerna för radioaktivt nedfall. Samtidigt släpptes det ut mer än 11 000 ton radioaktivt vatten i havet från det havsvatten som använts till nödkylning. Detta skapade en stor oro i resten av världen och nationella medier riktade kritik mot Japans premiärminister, Naoto Kan, som fick avgå. I samband med hans avgång tog Japan fram åtgärder för förnyelsebar energi och landet stängde även ner sina andra 54 aktiva kärnreaktorer. Man planerade dock att återgå till kärnkraft inom en snar framtid men förslaget mötte starka protester i hela Japan (D'Emilia 2015). År 2018 var nio reaktorer igång men år 2020 har flera stängts igen så att bara en reaktor är i gång (Lundberg 2020).

7.5.2 Tjernobyl-olyckan

7.5.2.1 Händelseförlopp

Den 26 april 1986 skedde kärnkraftsolyckan i staden Tjernobyl i Ukraina, som då var en sovjetrepublik. Det började med att några test av säkerhetsfunktioner kring kylvattenpumparna skulle genomföras på anläggningen, och med anledning av detta stängdes andra säkerhetssystem kring exempelvis nödstopp av. Försöken gjordes då reaktorn drevs på låg effekt. Den reaktortyp som användes var en modell som lätt kunde ställas om från elproduktion till tillverkning av vapenplutonium, och saknade en skyddande inneslutning av reaktorhärden. Den har dessutom en instabilitet vid låg effekt. Bränslestavar kunde bytas ut under drift och därför behövde driften ständigt kontrolleras, men härdens reaktivitet kunde öka vid för stort inskjut av styrestavar. (Dahlin 2016)

Trots en viss instabilitet på grund av låg effekt började testerna genomföras. Denna typ av reaktor hade en positiv void-effekt, vilket innebär att effekten ökar när ånghalten ökar. Detta leder till en ond cirkel om processen inte kontrolleras av till exempel styrestavar, men då styrestavarna i denna reaktor kunde leda till ökad effekt vid snabbt inskjut bromsade de inte den ökande effekten. På bara sekunder hade effektutvecklingen eskalerat till ett ohållbart tillstånd. Flera kraftiga explosioner skedde och i avsaknad av en skyddande inneslutning kring reaktorn fick de radioaktiva utsläppen stor spridning (Dahlin 2016).

7.5.2.2 Utsläpp från Tjernobyl-olyckan

Tre metoder användes för att beräkna utsläppen; det som släpptes ut under den aktiva delen, utsläppen efteråt och slutligen beräkningar på hur mycket radioaktiva ämnen som finns kvar i reaktorbyggnaden jämfört med hur mycket det fanns i kärnbränslet innan olyckan. Dagen efter olyckan mättes halterna av radioaktiva ämnen precis vid reaktorn, kärnkraftverket och i en 30-kilometers zon runt omkring. De ämnen som hade högst halt (i fallande ordning) var xenon, krypton, jod, tellurium, cesium, barium, strontium, neptunium och plutonium. Dock har det konstaterats vissa brister i de sovjetiska mätningarna och feluppskattningarna, speciellt kring de som har kort halveringstid. De totala utsläppen för ämnen med halveringstid över 20 h, framförallt cesium, jod och strontium, beräknades till ungefär 90 MCi (MegaCurie) (Borovoi & Gagarinskii 2001). Enheten Ci lämpar sig för starka radioaktiviteter. En Ci motsvarar $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

7.5.2.3 Hur meteorologin påverkade deposition och transport av utsläppen

Radioaktiva partiklar som har sitt ursprung i Tjernobyl-olyckan har dokumenterats i åtminstone 15 europeiska länder. Det cesium, Cs, som släpptes ut från reaktorn blev mycket finfördelat och steg med varm luft i atmosfären. Det bildades radioaktiva ”moln” av Cs (och andra radioaktiva partiklar) som på grund av goda luftflöden spreds långt från olycksplatsen. Luften över kärnkraftverket var i det speciella väderläget inversion, vilket innebär att luften är ”extremt stabilt skiktad” och att

varm luft inte stiger som den ska. De radioaktiva ämnena samlades då i olika stabila skikt beroende på storlek, vilket gjorde att de enkelt kunde transporteras iväg med de vindar som fanns på olika nivåer. Den största delen av utsläppen transporterades mot Polen och de nordiska länderna på grund av dessa ovanliga vind- och väderförhållanden (Pöllänen *et al.* 1997).

Under de tio dagar då den största delen av spridningen skedde var det även en del turbulens i rök- och dammplymen över reaktorn. Vertikala flöden inom plymen gjorde att partiklar som egentligen borde stannat i lägre luftlager beroende på sin storlek, hamnade i högre vindflöden och spreds till Europa. I Sverige regnade det i områden i främst mellan- och norra Sverige vilket innebar att radioaktiva partiklar regnade ner och förorenade marken. Detta skedde inte bara i Sverige, utan även i bland annat Finland och Polen (Pöllänen *et al.* 1997).

År 2021 fanns nio reaktorer av samma typ som reaktorn i Tjernoby1 (RBMK-reaktorer) i Ryssland i Sankt Petersburg, Kursk och Smolensk. De har uppdaterats för bättre säkerhet.

7.6 Miljö- och hälsorisker av radioaktiva ämnen

Det använda kärnbränslet utgör en direkt hälsorisk genom sin joniserande strålning. Exponering av strålning med så höga nivåer kan orsaka strålsjuka eller cancer vilka båda kan vara dödliga. Vid läckage av radioaktiva ämnen ut i naturen finns en stor risk att de i förlängningen intas av människor och djur (Tabell 12). Konsekvenserna av ett läckage beror på rörligheten hos de specifika radionuklider som läckt.

Tabell 12. Gränsvärden för radioaktivitet i livsmedel, främst viltkött. Källa: Livsmedelsverket 2018.

Radioaktivitet	Livsmedelsverkets råd
0-300 Bq/kg	Kan ätas i normal omfattning
300-1 500 Bq/kg	Bör inte ätas oftare än någon gång i veckan
1 500- Bq/kg	Bör inte ätas mer än några gånger per år
10 000- Bq/kg	Bör man inte äta alls

7.6.1 Strålning

Den radioaktiva strålningen kommer från sönderfallsprocessen för en atom. Strålningen kallas joniserande strålning om den är så energirik att den kan rycka loss elektroner från andra atomer som den träffar och förvandla dem till positivt laddade joner. SI-enheten för radioaktiv strålning är Becquerel, Bq, och 1 Bq innebär att det sker ett sönderfall (av en atomkärna) per sekund. En annan enhet är Sievert, Sv, vilket innebär ekvivalent dos och används när man vill mäta hur mycket strålning man utsatts för.

Tabell 13 ges en översikt av konsekvenser av strålning.

Tabell 13. Översikt av vad som ger olika stråldoser samt vilka konsekvenser det blir från strålning. Källa: Stuk uå.

Stråldos	Exempel på orsak alternativt konsekvensen
5 µSv	En timmes flygresa på marschhöjd
0,01 mSv	Tandröntgen
1 mSv	Dosen från en genomsnittlig röntgenundersökning
1–4 mSv	Normal årsdos från naturlig bakgrundsstrålning i Sverige
50 mSv	Högsta tillåtna dos per år för personer som arbetar med strålning
100 mSv	Risk för fosterskador
1 Sv	Förändringar i blodbanan
3–4 Sv	50 % chans att överleva, procenten varierar beroende på bl.a. ålder och hälsa
10 Sv	Dödlig dos i 100 % av fallen

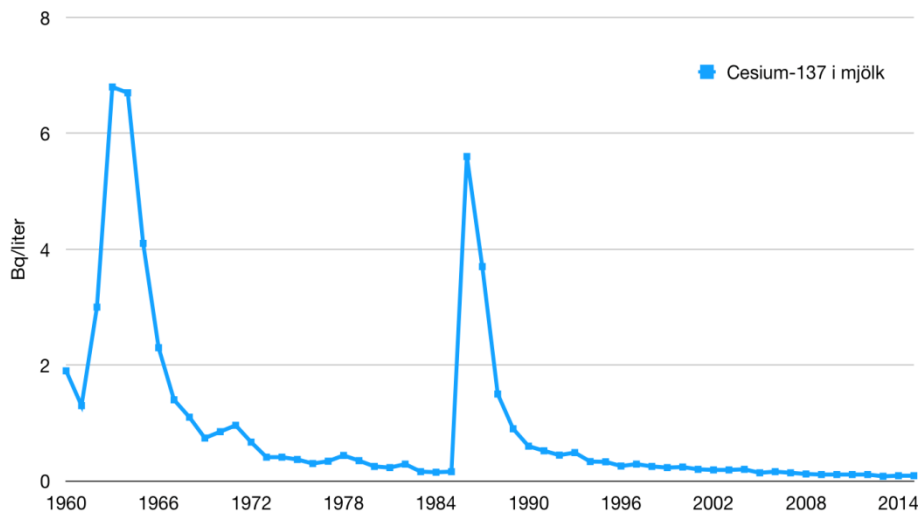
7.6.2 Radioekologi

Det finns tre sätt att beskriva halveringstid som har olika syften. Den fysikaliska halveringstiden beskrivs av den tid det tar för den radioaktiva substansen att sönderfalla tills hälften av massan kvarstår. Biologisk halveringstid är tiden det tar för att halten av ett radioaktivt ämne i ett biologiskt system, exempelvis ett djur, att minska till hälften. Denna tid beror alltså på omsättningen av ämnet i systemet. På motsvarande sätt beskriver ekologisk halveringstid tiden det tar för ett ämne att halveras i ett ekosystem (Fritzson 2013).

7.6.3 Cesium-137

Inom ramen för miljömålet om en strålsäker miljö mäts och övervakas cesiumhalten i mjölk. Cesium-137 är inte en naturlig isotop utan uppkommer endast vid utsläpp från fission. Nedfallen från 1960-talets kärnvapenprover och Tjernobylyckan hamnade i den svenska naturen och transporterades via betande kor till mjölken. Detta syns tydligt i Figur 32. Dagens låga nivåer på 0,1 Bq/l motsvarar ungefär 0,0002 mSv/år (Svenska miljömålen 2018).

I den svenska mjölken har aktiviteten minskat kraftigt och snabbare än den fysiska halveringstiden till mycket låga nivåer. Däremot har aktiviteten i vildsvin, renar och älgar inte minskat lika kraftigt och vissa djur kan ha aktiviteter långt över vad som anses ofarligt (Strålsäkerhetsmyndigheten 2017a). Orsaken till halterna av cesium-137 är huvudsakligen Tjernobylyckan som gav stort nedfall av radioaktiva ämnen i norra Uppland och mellersta Norrland.



Figur 32. Diagram över halten radioaktivt cesium-137 i svensk mjölk under 1960-2014. Bearbetad data från sverigesmiljomal.se.

7.6.4 Konsekvenser av Tjernobylolyckan

Veckor efter olyckan i Tjernobyl var radioaktiviteten i luften markant högre än normala värden. Då de radioaktiva partiklarna var luftburna blev depositionen på marken inte så stor på de flesta ställen. Däremot regnade det på vissa platser i Sverige och det radioaktiva nedfallet på marken blev högre i dessa områden, bland annat gäller det Västernorrland, Gävleborg, Västerbotten, Västmanland och Uppland. Till största del var det cesium-137, men även strontium-90 och plutonium. De högsta strålvärdena mättes till 200 kBq/m². Bär, svamp, viltkött och fiskkött, blev hälsofarliga att äta. Då Cs-137 har en halveringstid på 30 år kunde värdena flera år efter olyckan fortfarande vara över gränsvärdena, och livsmedelskontroller gjordes för att försäkra kunderna om en säker konsumtion. Rekommendationen var att den årliga strålningsdosen från livsmedel bör understiga 1 mSv/år. Femton år efter olyckan var det främst renkött, fiskkött och svamp som fortfarande kunde innehålla för höga mängder Cs-137, dock en mycket liten andel sett till den totala konsumtionsmängden (Moberg 2001).

Även trädbränsle för energiproduktion gav i vissa fall upphov till höga koncentrationer Cs-137 i askan, vilket gjorde att rekommendationer för säker avfallshantering togs fram för att undvika onödiga stråldoser. I jordbruksprodukter fanns främst Sr-90, men Statens Strålskyddsinstitut (numera en del av Strålsäkerhetsmyndigheten) har konstaterat att det aldrig var hälsofarliga mängder och att exempelvis mjölk kunde drickas som vanligt (Moberg 2001).

7.6.4.1 Kort- och långtidseffekter i Tjernobyl

Olyckan skedde i april, och i november samma år blev "sarkofagen" klar, en byggnad av stål och betong som byggts kring den havererade reaktorn. Den var dock instabil och hade mycket håligheter där radioaktivt damm kunde släppas ut. Under 1986 evakuerades 116 000 människor i en 30 km radie kring reaktorn då stråldo-

serna var för höga för att leva i. De första åren efter olyckan gjordes stora saneringar i samhällen i Tjernobylys närområde. Resultaten var varierande och saneringen resulterade i stora mängder avfall, och mycket av detta radioaktiva avfall dumpades inom 3-milsradien från reaktorn i grävda diken (Moberg 2001).

I reaktorns närområde dog en viss del av skogen efter olyckan och även vissa djur- och insektspopulationer hade en klar minskning, speciellt hos de som lever nära marken där strålningsnivån är högre. Några år efter olyckan har dock djur och växtlighet återhämtat sig relativt bra, till viss del på grund av frånvaron av mänsklig påverkan. En undersökning av genetiska långtidseffekter hos djur och växtlighet i närområdet har däremot inte gjorts i någon större omfattning (Moberg 2001).

7.6.5 Hälsoeffekter efter Tjernobyli- och Fukushima-olyckan

Människan utsätts för naturligt förekommande bakgrundsstrålning i en dos av 1-2 mSv/år. Kort efter Tjernobyli-olyckan uppmättes det högsta värdet i Sverige till 200 kBq/m². De mängder radioaktiva partiklar som fanns i luften gav dock inte upphov till några allvarliga hälsofaror och inga effekter så som ökning av cancerfall har observerats. Mätningar av strålning i livsmedel, främst från skog men också jordbruk till viss del, gjordes fortfarande 15 år efter olyckan för att säkerställa att strålningen var under gränsvärdet (Moberg 2001). Fortfarande mäts innehållet av Cs-137 i vildsvin från vissa geografiska områden i Västmanlands, Uppsala och Gävleborgs län då de fortfarande kan innehålla höga cesiumhalter (Livsmedelsverket 2022).

Hälsoeffekterna i området kring Tjernobyli blev däremot omfattande. Av de som jobbade med det akuta släcknings- och saneringsarbetet dog 30 människor, och 30 år efter olyckan har ungefär 6000 fall av sköldkörtelcancer hos främst barn konstaterats. Däremot har inte andra cancerformer eller sjukdomar ökat avsevärt i direkt samband med olyckan (UNSCEAR 2012). Den stress och oro som kommit i och med evakuering och försämrad livssituation och ekonomi har dock bedömts kunna stå för en ökning av sjukdom hos folk i Tjernobyliområdet (Moberg 2001).

Eftersom Fukushima-olyckan hände relativt nyligen har inga långtidseffekter på hälsan kunnat studeras ordentligt. På grund av betydligt bättre skyddsåtgärder än vid Tjernobyli-olyckan har inga direkta hälsorisker kopplade till strålning kunnat upptäckas. Även om det är svårt att se vilka hälsoeffekter Fukushima-olyckan bär med sig i nuläget, vet man att Japans befolkning kommer bli drabbade. En risk med att utsättas för strålning under lång tid är att den joniserade strålningen kan påverka kroppens organ till att tillverka cancerceller (Karlsson & Säljö 2014). Olyckan orsakade även en del sociala långtidseffekter så som att stora områden blev obebodda i decennier framöver, mycket åkermark blev helt obrukbar och att det japanska folket numera har en minskad tillit till stat och myndigheter (D'Emilia 2015).

7.7 Avveckling av kärnkraft

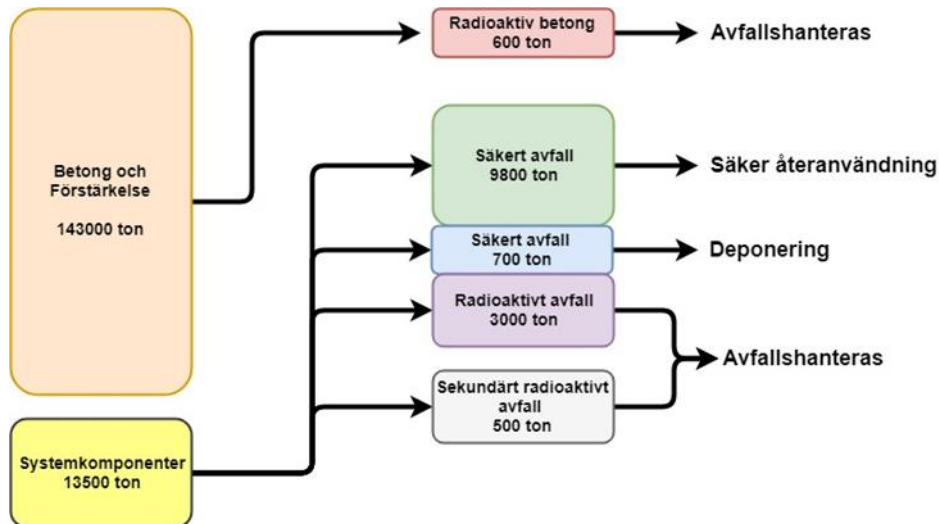
7.7.1 Bakgrund

Avvecklingen av kärnkraften är en debatterad fråga i Sverige. Folkomröstningen 1980 var första steget mot avvecklingen av kärnkraften. Det bestämdes att år 2010 skulle Sverige vara helt kärnkraftsfritt. Däremot stängdes endast två reaktorer ner vilka var reaktorerna vid kärnkraftverket i Barsebäck, år 1999 och 2005. När väl 2010 kom så var fortfarande 10 av 12 reaktorer igång och det pratades till och med att bygga fler eller byta ut gamla. Efter Fukushimaolyckan 2011 så ändrades denna inställning och Sverige gick återigen mot att avveckla kärnkraften. År 2018 går Sverige mot att ta bort kärnkraft ur energimixen. Hittills har två reaktorer i Oskarshamn (2017) och båda två i Barsebäck stängt ner (2019 och 2020). År 2022 finns sex reaktorer i drift som ägarna planerar att driva till omkring år 2040.

7.7.2 Utmaningar och påverkan på miljön

Kärnkraften står för stabil basproduktion av el i Sverige och står för ungefär 30 % av elproduktionen (Energimyndigheten 2018). En av utmaningarna för avvecklingen är vad man ska ersätta kärnkraften med. I Tyskland finns en liknande kärnkraftspolitik och miljömål som Sverige. 1990 började Tyskland med "Energiewende" som är namnet på miljömålet med mål för att öka andelen av den totala energin till förnybar energi. Efter Fukushimaolyckan tillade Tyskland att avveckla kärnkraft skulle läggas till detta mål. 2015 hade Tyskland stängt ner 11 av totalt 20 reaktorer. Målet är att stänga ner 8 till innan 2022. Statistiken visar att Tyskland har ökat sin förnyelsebara energiproduktion från 3,6 % år 1990 till 25,8 % år 2014 och kärnkraften har gått från 27,7 % år 1990 till 15,5 % år 2014. Tyskland har behövt satsa mer på energisystem som kan hjälpa till med den varierande energibalansen som vind- och solkraften orsakar. Även med stora variationer i elproduktionen har dock Tyskland ett av de mest stabila elnätet i världen (Agora Energiewende 2015). Tyskland har alltså kunnat byta ut kärnkraft mot förnyelsebar energi men det har inte gått helt felfritt. Ett av Energiewende:s mål är att skära ner på koldioxidutsläppen men Tysklands kolkraft är nästan helt oförändrad från 1990. Detta kan bero på avvecklingen av kärnkraften men ökningen av kolanvändningen i Tyskland är på grund av den låga kostnaden för kol- och koldioxidutsläpp i EU (Naturvårdsverket 2018a).

Det finns dock fler utmaningar än bara ersättningen av kärnkraften. Det utgör en fara att ta hand om rester och bränsle när kärnkraften ska avvecklas. Av allt rivningsavfall så har ca 10 % av avfallet varit i kontakt med strålning och kommer behöva omhändertas på samma sätt som radioaktivt kärnbränsleavfall (Strålsäkerhetsmyndigheten 2018). Detta kan vara väldigt mycket avfall. I Figur 33 illustreras massflödet för rivningen av en tryckvattenreaktor. Runt 4100 ton avfall måste hanteras och lagras över en längre tid då materialet har utsatts för radioaktiv strålning.



Figur 33. Diagram på hur mycket av rivningsmaterialet som måste omhändertas. Bearbetade data från Deutsches Atomforum 2013.

Avfallet under rivningen är inte det enda problemet, det är en tidskrävande och dyr process. Godkännandeprocessen kan ta upp till fem år och själva rivningen tar upp till tio år (Deutsches Atomforum 2013). Avvecklingen av kärnkraftverket i Niederaichbach, Tyskland kostade 130 miljoner euro (Wiegl 2008). Det är ägarna av kärnkraftverken som betalar men avvecklingen finansieras även från kärnavfallsfonden (OKG 2017). Även om kärnkraften kan bytas ut i elmixen när en kärnkraftsreaktor tas ur drift, är hantering och finansiering av det radioaktiva rivningsmaterialet kvar under många år.

7.8 Koppling till svenska och globala mål

7.8.1 Svenska miljömålen

Kärnkraften påverkas till störst del av miljö kvalitetskravet ”Säker strålmiljö” som ingår i Sveriges miljömål. Målet är uppdelat i fyra områden där kärnkraften påverkas endast av två: ”Strålskyddsprincipen” och ”Radioaktiva ämnen”. Strålskyddsprincipen har som mål att begränsa exponeringen av skadlig strålning i arbetslivet och övriga miljöer. I Naturvårdsverkets uppföljning 2018 beskrivs kärnkraften inte vara något större problem i Sverige. Svenska kärnkraftverk har bedrivits på ett säkert sätt som har levt upp till standard och uppfyllt Strålsäkerhetsmyndighetens krav. Däremot har brister observerats och kärnkraftverken kan fortfarande stärka sin strålsäkerhet (Naturvårdsverket 2018b). Preciseringsen ”Radioaktiva ämnen” har som syfte att begränsa utsläppet av farliga radioaktiva ämnen så både människans hälsa och biologiska mångfalden skyddas. Strålsäkerhetsmyndigheten sätter då upp gränsvärden för radioaktiva utsläpp och ser till att kraftverk håller sig under dessa med marginal. Bedömningen är att exponering av strålning i miljön är väldigt låg, den största strålningen är fortfarande cesium från Tjernobylolyckan. Kärnkraften inte utgör något direkt hot och Naturvårdsverket har bedömt att kvalitetsmålet kommer att uppnås till 2020 (Naturvårdsverket 2018b). Men även om kärnkraften i

Sverige uppnår de krav SSM har satt upp så utgör kärnkraft fortfarande en risk. Vid olycka kan det tillkomma allvarliga konsekvenser och Sverige går fortfarande mot avveckling av kärnkraften.

7.8.2 FN:s globala mål

De svenska miljömålen är sammanvävda med FN:s globala mål för 2030 och säker strålmiljö är kopplat starkt till **mål 3** som är "**Hälsa och välbefinnande**". Kärnkraften rör också många andra mål inom Agenda 2030. Strålsäkerhetsmyndigheten har fått i uppdrag att fullfölja dessa mål. I uppdragen uttrycks det tydligt att allt avfall, radioaktivt eller inte ska omhändertas på ett varsamt sätt och begränsas (Strålsäkerhetsmyndigheten 2016). Fokus för de globala målen är säkerheten och avfallshandlingen. Agenda 2030-målen påverkar inte kärnkraften mycket då dess mål och syn på kärnkraft är neutral, såvida avfallet kan hanteras och strålsäkerheten hålls uppe.

7.9 Instuderingsfrågor

- Hur kan kärnkraftverks kylsystem nyttja olika mycket vatten?
- Hur ska de så kallade barriärerna hindra det deponerade radioaktiva avfallet från att läcka ut i geosfären?
- Hur påverkades Sverige av Tjernobyl-olyckan, både kort- och långsiktigt?
- Vilket är det vanligaste sättet att bryta uran och vilka miljöeffekter har det?
- Nämn två problem som uppstår vid rivning av kärnkraftverk?
- Vilka radioaktiva utsläpp skedde i samband med Fukushima olyckan?
- Varför behövs det tre sätt att beräkna halveringstid?
- Vilka miljöeffekter blir det av varmt kylvatten?

8 Vind- och vågkrafts miljöpåverkan

En av vår tids största utmaningar är att bromsa de klimatförändringar som beräknas äga rum inom en överskådlig framtid. För att åstadkomma detta krävs en omställning från kolbaserad energiproduktion till en energiproduktion som baseras helt på förnybara energikällor. Två förnybara energikällor som kan användas i framtidens energimix är våg- och vindkraft. Energiproduktion från dessa energikällor har minimala utsläpp vid drift men det betyder inte att det inte finns några negativa miljöeffekter. I denna del kommer vi att behandla olika typer av miljöpåverkan från vind- och vågkraft samt hur dessa knyter an till de svenska miljömålen och Agenda 2030.

8.1 Miljöpåverkan från råvaror till våg- och vindkraft

8.1.1 Generellt

Ett vindkraftverk består av fundament/bas, torn, maskinhus och rotor. I maskinhuset finns de mer avancerade komponenterna och därmed även de mer avancerade materialen. Till resten av vindkraftverken används relativt generiska material om vi bortser från delar av rotorerna. Fundamenten är vanligtvis betong förstärkt med stål. Tornet är också av stål. Maskinhuset och rotorn är byggda för att vara så lätta som möjligt men också stabila. Därför består dessa av bl.a. glasfiber, kolfiber och plast, utöver stål och järn. I rotorn är mängden material som inte är stål runt 40-50 % (Haapala & Prempreeda 2014). Kunstruktionen av vågkraftverk varierar och källor på vilka råvaror som går åt studerar enskilda fall. De kan dock liknas med materialen som går åt till vindkraftverk. Stål till chassin och betongfundament är exempel på liknande komponenter. Det går däremot att argumentera för att materialen för vågkraftverk behöver vara beständigare än de till vindkraftverk. Detta eftersom de ska fungera i en mer slitsam miljö, vilket Sidén (2015) pekar ut. Framställningen kan därför vara mer miljöbelastande per kg komponent för vågkraft. Deras totala vikt är dock lägre och en slutsats om vilken produkt som totalt är mest miljöbelastande är svår att dra.

Materialen som ingår i delar till vind- och vågkraft är inga bristvaror men deras framställning kommer med miljökonsekvenser liksom all materialframställning. Av de material som nämns ovan bidrar stålet med störst miljöpåverkan, både eftersom det är det material som förekommer mest i konstruktionen men också för att det är kopplat till en framställningsprocess som har stora utsläpp av framför allt växthusgaser (Haapala & Prempreeda 2014). Även vid tillverkning av t.ex. fundamentet blir det utsläpp av växthusgaser vid framställningen av cement.

8.1.2 Generatorer

Generatorer kräver olika resurser beroende på applikation. I fallen vind- och vågkraft kan flera typer av generatorer användas. Traditionellt har tekniken byggt på att rotationshastigheten i rotorn är hög (>1000 rpm) men sedan starka perma-

nentmagneter började kommersialiseras har generatorer vilka kan hantera lägre rotationshastigheter (PMSG, permanentmagnetiska synkrogeneratorer) blivit allt vanligare (Pavel *et al.* 2017). När ett vindkraftverk snurrar eller ett vågkraftverk oscillerar gör de inte det särskilt snabbt. Att tidigare (innan PMSG) ha behövt växla upp denna hastighet har inneburit att växellådor behövs användas vilka kräver mer underhåll. Effektiviteten har också gått att öka genom användningen av permanentmagneter (Pavel *et al.* 2017).

Permanentmagneter till generatorer är idag NdFeB-legeringar. Nd, neodymium, är en sällsynt jordartsmetall vilket både gör dessa typer av magneter dyra och kostsamma ur ett miljöperspektiv. Mer om detta nedan. Traditionella generatorer har använt sig av elektromagneter gjorda av koppar som konsumerar elektricitet för att skapa ett magnetfält.

Jämför vi traditionella generatorer med PMSG är det däremot inte självklart att den senare av de två är mest skadlig för miljön eftersom den använder sällsynta jordartsmetaller. T.ex. har Venås (2015) kunnat visa att den minskade kopparanvändningen i PMSG bidrar till att framför allt övergödning och ekotoxicitet minskar eftersom kopparframställningen har stora utsläpp.

8.1.2.1 Sällsynta jordartsmetaller

Sällsynta jordartsmetaller (RE, Rare Earth metals) kallas sällsynta, inte för att mängden av dem är låg i jordskorpan, utan för att de inte finns samlade i kluster som många andra metaller finns. Metallerna som klassificeras på detta vis går att finna på plats 57-71 i periodiska systemet. Dessutom räknas yttrium och scandium till dessa. Även om dessa metaller finns på många platser på jorden finns störst reserver i Kina. De har också ett näst intill monopol på försäljningen av dessa, över 85 % av världsmarknaden (Sprecher *et al.* 2014). Tillgången är omtalad och varierar beroende på källa. Kina påstår att ämnena kan ta slut inom 20 år, medan forskare påpekar att det kan vara en strategi för Kina att driva upp priserna. De påstår att det största orosmolnet som ligger framför oss inte handlar om att ämnena tar slut utan att det blir ett avbrott i produktionen när de blir svårare att utvinna (Turner 2017). De finns även undersökningar som visar att de resurser som finns idag kan försörja den produktion vi har idag i ytterligare 100 år (Zhou *et al.* 2017). För att inte tala om geopolitiska och ekonomiska problem förknippade med RE finns även stora bekymmer vad gäller miljöpåverkan från framställningen av dessa.

Processen för att ta fram RE beskrivs av bl.a. Sprecher *et al.* (2014) och börjar med traditionell gruvdrift där grävning, borrhning och sprängning används. Eftersom de mineraler som grävs fram endast innehåller enstaka procent RE behöver de anrikas. Stegen som leder fram till ett rent ämne (99 %) inkluderar tillsats av svavelsyra, natriumhydroxid och saltsyra. I omgångar hettas ämnena upp till mycket höga temperaturer med hjälp av fossila bränslen. Dessutom används elektrolys för att separera ämnen vilket konsumerar stora volymer elektrisk energi. Utsläppen från dessa processer kan variera beroende på vilken teknik som används. Något som framhålls

av Sprecher *et al.* är att det saknas information om hur pass bra tekniken som används faktiskt är, framför allt i Kina. Däremot har många äldre och mindre anläggningar för RE-produktion i landet stängts ner vilket kan indikera att den mest föråldrade och miljöskadliga tekniken till viss del fasats ut.

Gruvdriften och anrikningen är förknippad med flera miljöpåverkansfaktorer. Försurning, ekotoxicitet, växthusgasutsläpp, landskapsförändring, övergödning, human toxicitet och joniserande strålning. De två senare beror på att det ofta förekommer radioaktiva ämnen (uran och torium) i de mineraler som grävs upp vilket är ett stort problem för de som arbetar med framställningen. Radioaktiva ämnen kan även följa med i avloppsvattnet och kontaminera närliggande vattendrag och natur. Även om strålningen i många fall är för svag för att tränga genom hud kan stoft inandas eller förtäras och medföra ökad risk för olika sorter av cancer (Venås 2015, Massari & Ruberti 2013).

8.2 I vilken typ av miljö är vindförhållandena optimala för vindkraft?

Frågan vad optimala vindförhållanden för vindkraft är kan verka trivial. Det är lätt att säga att vinden ska vara så kraftfull som möjligt, men detta är både fel och onyanserat. För det första är vindkraftverk av mekaniska skäl designade för att bromsa in sig själv om det roterar för fort. Gränsen för vilka vindhastigheter som ger optimal effekt kan variera beroende på optimering hos verket men ligger vanligtvis inom intervallet 12-15 m/s. För att nyansera bilden ska det påpekas att detta är den momentana vindhastigheten. I realiteten kommer vinden endast upp i sådana hastigheter vid enskilda tillfällen (byvindar, stormar, etc.). För att avgöra om en miljö är lämplig för vindkraft bör även medelvindhastigheten vara hög (Sidén 2015).

Vad som påverkar både momentan- och medelvindhastighet är både geografisk och topografisk placering. Det finns platser på jorden där det ofta blåser mer eller mindre på grund av globala vindsystem, höga temperaturvariationer, kringliggande berg, sjöbris och dylikt. Dessa varierar kanske inte i en kommun eller ett län, men kan definitivt variera i ett land. T.ex. blåser det mer på Sveriges västkust än på östkusten och än mindre i inlandet. Topografin spelar också roll och kan göra det i mindre skala. Alla hinder orsakar turbulens som stör vindhastigheten. Vindhastigheten ökar med höjd över marken och därför kan effekten av hinder undvikas genom att placera rotorn på hög höjd. Ju färre lokala hinder desto bättre (starkare) vindförhållanden. Ute på havet finns minimal störning varför också vindhastigheterna är högre där än inåt land, upp till 50 % högre medelvind (vindkraft placeras dock främst på relativt grunt vatten, 30 m, av monterings tekniska skäl). Väl uppe på land kan allt från kullar till träd och byggnader störa vinden. Vindhastigheterna är typiskt 9 m/s till havs och 5-7 m/s vid inland och kust (Sidén 2015).

8.3 I vilken typ av miljö är det bäst vågor för vågkraft?

Vågor uppstår från vindens friktion mot vattenytan. Det är därför en logisk slutsats att vågornas energi är som störst när och där det blåser som mest. I och med detta är vågkraften varierande precis som vindkraften, men eftersom vinden påverkar vågorna över en längre sträcka och tid kan vågenergi ses som utjämnad vindenergi. Vågans energi är som störst vid vattenytan och avtar exponentiellt med djupet. Därför kan vågenergin bara utvinnas just vid eller nära vattenytan. På platser med djupt vatten finns det färre bromsklossar för vågornas uppbyggnad och därför blir energin hos vågorna högre där. När vågorna når in mot strandkanten kan de mer än halveras i energiinnehåll. Därför bör strandbaserad vågkraft placeras vid strandkanter med så stort djup som möjligt (Sidén 2015).

Den geografiska distributionen av vågenergi beror i största grad på om havsområdet ligger i lä. Om det finns kortare sträckor för vågor att byggas upp kommer de inte kunna ackumulera lika mycket energi från vinden. Ett exempel är Sveriges västkust (i lä från Danmark) där energiinnehållet i vågorna är mellan 3-6 kW per meter våg, jämfört med Norges västkust (öppen mot Atlanten) vars vågor i medeltal har en energi om 50 kW per meter våg. I övrigt är de nordliga och sydliga tempererade zonerna bäst för etablering av vågkraft där starka västliga vindar dominerar (Sidén 2015).

8.4 Vågkraftens miljöeffekter

8.4.1 Störningar vid installationen

Nästan alla marina förnybara energikällor kräver någon sorts fundament som håller konstruktionen på plats. Installationen av dessa fundament samt kabelstrukturen mellan alla komponenter leder till en viss oönskad störning av det naturliga ekosystemet. Inte minst bidrar all aktivitet i området vid byggnation till en viss turbulens med höga ljudvolymmer, spridning av bottenpartiklar och varierande strömmar. På grund av detta är ett undvikande beteende från vissa vattenlevande djur förväntat medan fysiska och traumatiska upplevelser kan leda till döden för andra. På grunda stränder har installationen en större miljöpåverkan eftersom det kan leda till att viktig vegetation förstörs. Mer önskvärt är istället att placera verken lite längre ut från stranden, mest troligen på en sedimentär botten av sand och lera. Som vi vet är det även fördelaktigt då vågorna innehåller mer energi längre från stranden där det är lite djupare. Här är installationsfasen generellt sett inte förväntad att ha någon större negativ påverkan på det existerande ekosystemet eftersom bottenhabitatet varken är särskilt unika eller har stor aktivitet relativt sett. Det är även en relativt liten andel av botten som försvinner i och med att det bara är den bottenytan där själva fundamenten placeras som fördärvas. Den ytan ersätts istället med en för många vattenlevande organismer attraktiv fast struktur. Det är trots detta viktigt att områden där vågkraftsparker planeras byggas undersöks noggrant för att undvika att viktiga ekosystem skadas (Hammar 2014).

8.4.2 Hydrodynamiska förändringar

När vågkraftsmodulerna via installationen är utplacerade i havet finns det nya strukturer i vågkraftsparkens vatten som vattenmassorna måste anpassa sig till. Det här kan leda till en del olika förändrade vattenflöden både för undervattensströmmar samt vågorna som sedan kommer in till land. Detta kan påverka bottenstrukturen samt strandklimatet mellan vågkraftsparken och land. Skillnaden ska dock vara så liten att den inte har någon betydande inverkan på ekosystemen (Langhamer *et al.* 2009, Hammar 2014).

8.4.3 Artificiella rev skapas

När byggnationsfasen och dess störningsmoment är borta kan systemet börja återhämta sig och fundamenten kan fungera som artificiella rev för de vattenlevande organismerna. De nya fasta strukturerna och håligheterna i fundamenten bidrar till att ekosystemet introduceras till fler olika biologiska nischer och habitat. Det här betyder att fler arter har möjlighet att etablera sig i området, inte minst sessila organismer som kräver fasta strukturer att fästa sig på. Det här leder till att den biologiska mångfalden i området kan öka och i och med att det finns mer yta för växter som till exempel alger att växa på ökar även den totala biomassan i området. Fler nischer och habitat, större biologisk mångfald och en högre biomassa, alla dessa faktorer leder till ett mer aktivt och rikare ekosystem. Detta är en positiv påverkan som vågkraften har på den marina miljön och bidrar till att skapa en levande kust och skärgård (Langhamer *et al.* 2009, Hammar 2014).

Farhågor med denna förändring är risken att nyetablerade arter konkurrerar ut gamla och ekosystemet förändras eller att ekosystemet inte återhämtar sig. Det nya ekosystemet som då bildats kan ha nya mönster av predation, konkurrens och parasitism vilket ger upphov till en större men förändrad mångfald i området. De ursprungliga habitaterna finns fortfarande orörda på många platser i vågkraftsparken då modulernas påverkan är mycket lokal och vågkraftsmodulerna installerats med ett visst mellanrum. Den speciella nisch som ursprungsarterna har anpassat sig till och lever i har alltså inte försvunnit i de flesta fall. Ett ökat predationstryck kan dock påverka ursprungsarterna i det nya ekosystemet (Langhamer *et al.* 2009, Hammar 2014).

8.4.4 Effekter från ljud i drift

Vågkraftverken genererar i regel inga märkbara driftljud vid ytan i jämförelse med vindkraften där ljudnivån från ljudkällan kan uppgå till mellan 130–150 dB (Hammar 2014). De ljud som kan uppkomma däremot är ett mekaniskt ljud från generatoren och ett surrande ljud från transformatorn. Den högsta ljudvolymen från generatoren är uppmätt till 160 dB i vattnet och 100 dB vid ytan. Så höga ljudvolymmer uppmäts bara vid extremväder, det betyder att även bakgrundsljudet från havet är mycket starkt och generatorns ljud blir försumbart i sammanhanget. När sedan havets bakgrundsljud minskar avtar även ljudet från generatoren. Vatten som medium har dock en högre densitet än luften och transporterar ljud betydligt snabbare och

längre än vad luft gör. Det här leder till att vågkraften kan påverka en större vattenmassa men då med lägre ljudnivåer (Ström 2014). Det är känt att undervattensbuller påverkar olika typer av vattenlevande djur som sälar, valar, kräftdjur och diverse olika fiskar. Mest utsatta blir arter som använder sig av undervattensljud för vardagliga ting som att kommunicera, lokalisera lek- och födosöksplatser, hitta varandra och eller undvika rovdjur. Många vattenlevande organismer har visats bli stressade av undervattensbullret men det har även visats att vissa valar och sälar kan vänja sig till dessa ljudvolymmer och leva som vanligt. Det är dock svårt att mäta konsekvenser av driftbullret och studier visar på reaktioner allt från temporär beteendeförändring med förvirring till kortsiktig attraktion (Langhamer *et al.* 2009).

8.4.5 Effekter från elektromagnetism

Vågkraftverken genererar elektricitet som sen måste transporteras in till land där den sedan används. Detta görs via stora och mycket dyra kabellänkar som hela tiden ger upphov till magnet- och inducerade elektriska fält. Dessa effekter blir större desto högre ström kablarna förflyttar. Det här betyder att kablar med lägre ström och högre spänning har en mindre elektromagnetisk effekt, därför kan det ur denna synvinkel ha en positiv påverkan för vissa vattenlevande djur att använda AC- istället för DC-kablar. Effekten skulle ytterligare minimeras genom att gräva ner kablarna i havsbotten. Ett antal olika vattenlevande djur som sköldpaddor, kräftdjur, marina däggdjur och vandrande fiskar använder sig av jordens magnetfält för navigering och kan störas av dessa artificiella magnetfält. Påverkan är dock mycket liten vilket gör att övergripande slutsatser svåra att dra förutom att en lägre ström i kablarna medför mindre elektromagnetiska effekter runtomkring. Även avståndet till kablarna är en viktig parameter för de marina djuren då fältets styrka snabbt avtar. Studier visar även att icke-känsliga marina organismer kring redan existerande kablar inte verkar ha några förändrade levnadsmönster (Langhamer *et al.* 2009, Hammar 2014)

8.4.6 Påverkan på fiskemöjligheter - "No take zone"

En direkt påverkan vågkraftverk har på miljön är att dess infrastruktur ockuperar stora arealer fiskevatten för yrkesfiskare. Eftersom vattnet är fyllt av kablar och moduler går där inte att fiska och tråla, detta leder till att vågkraftsparkerna bildar en sorts frizon för de vattenlevande djuren i området. Vågkraftsparker skapar därmed en tvist om områdets användningsområde eftersom yrkesfiskarna vill ha kvar sitt lukrativa fiskevatten för att kunna ha kvar sin verksamhet (Yrkesfiskarna 2010). Istället bildas en så kallad "no take zone" där marina organismer kan leva i en typ av marint skyddsområde utan risk att bli fångade i linor och nät. Uppförandet av marina naturreservat liknande dem vågkraftsparker bildar visar på både ökad fisktäthet och biologisk mångfald. Även i de närliggande områdena till dessa parker har fisktätheten ökat vilket betyder att i längden skulle även yrkesfiskarna kunna gynnas av dessa marina naturreservat (Langhamer *et al.* 2009).

Många naturvårdare och ekologer ser stora problem med dagens överutnyttjade hav och världsnaturfonden (WWF 2015) varnar för att många av havets populationer minskar eller är utrotningshotade. Fler marina naturreservat liknande dem som bildas av vågkraftverken skulle kunna vara en bidragande faktor till ett återpopulationsarbete för att åter stärka havets populationer och ge dem säkra platser att växa och leva i (Langhamer *et al.* 2009).

8.5 Havsbaserade vindkraftverk

8.5.1 Miljöeffekter vid anläggning

En havsbaserad vindkraftspark orsakar flera miljöeffekter. Både under byggnationen och även när parken färdigställts. Dessa effekter är liknar de för vågkraft: sedimentering av biologiskt samt icke-biologiskt material, ändrade strömningsförhållanden bildandet av artificiella rev och även ljud som uppkommer vid pålning.

8.5.2 Ljud under konstruktionsfas

Pålning i havsbotten är en högljudd nödvändighet vid byggnation av traditionella havsbaserade vindkraftverk. Det man gör är att driva ned pålar i havsbotten, antingen genom att hamra, eller vibrera ned dem i botten, dessa pålar blir sedan grund för att ett vindkraftverk ska kunna stå stadigt ovan ytan. Denna ljudförorening kan ha skadliga effekter på det lokala djurlivet, ljudnivån från pålning kan vara så pass hög att det marina djurlivet kan störas, skadas, eller rentav dödas. Som tidigare nämnts i avsnitt 8.4.4 kan ljudet färdas både snabbare och längre i vatten vilket gör den marina miljön extra känslig för ljudföroreningar. Pålningen tar normalt endast en dag per verk, men vid etablering av större vindkraftparker kan störningen bli mer långvarig.

Tekniker finns både för att minimera ljudnivån, samt för att förhindra att ljudet kan spridas längre sträckor. Att använda sig av en kombination mellan vibreringsmetoden och pålningsmetoden ger något lägre ljudnivåer i snitt än att enbart använda pålningsmetoden. Anledningen till detta är att färre slag av hammaren krävs för att driva ned pålen. För att förhindra en spridning av ljudet kan man bl.a. använda sig av så kallade bubbelgardiner. Man bildar denna bubbelgardin genom att släppa ut bubblor vid botten runt pålningsområdet. Denna metod kan sänka ljudnivån med mellan 5-18 dB, en avsevärd skillnad eftersom decibelskalan är logaritmisk och en minskning med 10dB innebär en halvering av ljudnivån. Den stora variationen i hur mycket ljudet dämpas beror på skillnader i miljön där metoden tillämpas. Snabba strömmar eller stora djup kan störa hur effektiv bubbelgardinsmetoden är. (Andersson *et al.* 2017)

Hänsyn till kritiska datum och lokala miljöförhållanden är viktigt innan en pålningsoperation inleds. Kritiska datum ger information om vid vilka tidpunkter på året en viss miljö är extra känslig, t.ex. tiden tumlaren föder sina kalvar. Lokala miljöförhållanden ger information om hur långt ljudet kan färdas vid just den plats

som är i fråga. Sill och skarpsill har bäst hörsel av de svenska marina arterna följt av andra arter med simblåsa som t.ex. torsk. Fisk utan simblåsa, som makrill och plattfiskar har sämre känslighet för ljud (Bergström *et al.* 2022). Marina däggdjur, som tumlare och säl, är mycket känsliga för de ljud som uppkommer vid pålning och eventuella detonationer och på tiotals km avstånd. De kan få permanenta hörselskador om de är kvar i området under anläggningsfasen. Sjöfågel förväntas inte påverkas annat än kortvarigt och tillfälligt av ljud under anläggningsfasen.

Sverige saknar idag regelverk för vilka ljudnivåer som bör tillåtas i den marina miljön. Det finns inte några riktlinjer för tillåtna ljudnivåer. Andra länder inom Europa har etablerade metoder för att analysera och rapportera vilka ljudnivåer som skapas (Andersson *et al.* 2017). Det finns då riktlinjer för vilka ljudnivåer som kan orsaka skador på marint djurliv.

8.5.3 Artificiella rev och sedimentation

Två typer av sedimentation kan uppstå från havsbaserad vindkraft. Den första typen är den som sker under byggnationsfasen. Denna orsakas av att vattnet uppgrumlas av sediment när man pålar i botten. Detta kan skada miljön genom att vegetation övertäcks med sediment och ljusinstrålningen minskar. Denna typ av miljöpåverkan pågår endast under en begränsad tid och bedöms inte till att vara något större problem för den lokala faunan (Elmqvist 2008).

En annan typ av sedimentering från vindkraftverk orsakas av att fundamenten agerar som artificiella rev, där musslor och alger kan växa och leva. När dessa sedan dör och faller till botten berikas denna med ett nytt och för området ett eventuellt annorlunda substrat. Detta kan medföra att andra organismer som inte tidigare varit en del av det lokala ekosystemet på botten kan komma och förändra de lokala trofiska förhållandena, vilket kan ge syrefattiga bottenar och övergödning. (Naturvårdsverket 2006)

Även fiskar lockas hit tack vare den ökade tillgången på föda samt för det skydd som dessa artificiella rev utgör, detta är även fallet för vågkraften. Man har dock hittills inte kunnat visa på om detta leder till en ökad population av de berörda arterna eller om de enbart koncentreras till ett och samma ställe. (Elmqvist 2008)

Strömningsförhållandena i vattnet påverkas av stora vindkraftsparker. Detta kan komma att påverka mängden av rörliga och fastsittande larver. Minskar strömningshastigheten riskerar områden av hårda bottenar att förvandlas till mjuka bottenar vilket skulle få konsekvenser för hela det lokala ekosystemet. En annan konsekvens som kan uppstå är att det blir turbulens vid fundamenten. Detta kan innebära att sediment rörs upp och grumlar vattnet under en längre tid vilket medför ett sämre siktförhållande samt mindre ljus till fotosyntetiserande organismer som då inte kan växa lika bra. (Naturvårdsverket 2006)

8.5.4 Naturligt naturreservat

En annan konsekvens som kan uppstå tack vare en vindkraftspark kan vara att man inte längre kan tråla i området. Detta eftersom det både uppstår fysiska hinder samt att det finns känsliga kablar i närheten av verken. Däremot kan man fortfarande fiska till skillnad från vid vågkraftsparkerna. Detta gör att parkerna kan komma att fungera som marina naturreservat. Musslor dras till verkens fundament, musselätande fåglar dras till musslorna och fiskar dras till skyddet. (Naturvårdsverket 2006)

Flera effekter som påverkar hur ekosystem förändras vid dessa fasta undervattensstrukturer är mycket lika dem från vågkraft och kan läsas om i avsnitt 8.4.3.

8.5.5 Miljöeffekter vid drift

8.5.5.1 Undervattenshabitat och fiskemöjligheter

Precis som med vågkraftverk så kan också havsbaserade vindkraftverk skapa konstgjorda habitat för diverse havsorganismer. I detta fall är det själva fundamenten till kraftverken som ger plats för fastsittande och filtrerande arter. Bottennära arter etableras på fundamenten och även om ytan är liten i förhållande till totala bottenytan kan det förändra artsammansättningen lokalt (Bergström *et al.* 2022). På sikt kan det uppstå en reveffekt. I Västerhavet förväntas blåmusslor och havsane-moner dominera efter ett antal år och krabbor och humrar kan gynnas av de håligheter som bildas vid eventuella erosionsskydd vid fundamenten (*ibid.*). I Östersjön förväntas blåmusslor dominera ytorna på fundamenten (*ibid.*). Skillnaden mot ett naturligt rev är att fundamentet sträcker sig ända till ytan med möjlighet för fintrådiga alger och havstulpaner att etablera sig närmast ytan. Betong koloniserar lättare än stål så att reveffekten blir snabbare vid betongfundament. Fisk och marina däggdjur attraheras till området när revet är etablerat.

I en svensk studie fann man att det vid botten av fundamenten fanns mycket av både havstulpaner och blåmusslor, definitivt större mängder än vid kontrollplatserna. Dessutom var blåmusslorna större i genomsnitt än de vid kontrollplatserna. Detta var alltså de man hittade på själva ytorna på fundamenten. Fiskarna man hittade i närheten av dessa ytor räknades också och även där fann man en kraftig ökning jämfört med kontrollplatserna i fritt vatten. Tusentals fiskar befann sig nära fundamenten, de vanligaste arterna var sjustrålig smörbult, svart smörbult och sandstubb. Sjustrålig smörbult var vanligast till antalet, och de flesta av de individerna var yngre än ett år. Totalt hittade man 13 olika fiskarter i närheten av verken.

I Storbritannien har man gjort en undersökning bland hobbyfiskare vad man har för åsikter generellt om att det byggs vindkraft på platser där man fiskar och också vad folk har för erfarenheter av att faktiskt fiska i sådana områden. De flesta var positiva till att bygga havsbaserade vindkraftsparker främst av uppfattningen att det ska finnas mer fisk i närheten av verken, men också för att många tycker det är positivt med utsläppsfri el. Av de som faktiskt hade fiskat i närheten av verken så var upp-

levelserna väldigt blandade, vissa hade haft sämre fångst än innan man byggde verken och vissa hade haft bättre fångst och många märkte ingen skillnad. Detta kan bero på att man inte kan åka hur nära verken som helst med båtar, och då inte når de allra tätaste ställena. (Hooper 2017)

För kommersiellt fiske kan situationen se annorlunda ut. I bra väder så går det bra att åka med ganska stora båtar genom vindparkerna för då kan man helt enkelt se ut genom fönstren för att navigera båten och undvika kollisioner. När det är dåligt väder är man dock beroende av radar i stora fiskebåtar och då kan det uppstå problem om man åker nära vindturbiner då de inte alltid visas tydligt på radarn. Självklart så beror denna fara helt på storleken på båten i fråga samt avstånden mellan vindturbinerna så det kan variera ganska kraftigt. Att tråla i en vindkraftspark är teoretiskt möjligt om man vet hur kablarna på botten är installerade och om det är rimligt avstånd mellan verken för att båten ska få plats, men kan vara riskabelt och farligt att försöka. Av dessa anledningar är det dessutom förbjudet i många vindkraftsparker. (Hallowell 2013, Bergman et al 2015)

8.5.5.2 *Ljudpåverkan på djur i vatten*

En annan del av den svenska studien var att göra experiment i laboratorier på hur fiskarna spigg och mört reagerar på ljud som kan uppstå från vindkraftverk i drift. Man använde både inspelade ljud från riktiga vindkraftverk i drift, samt ljud med bestämda exakta frekvenser. De resultat man observerade var att vid låga frekvenser så reagerade inga av fiskarna märkbart, men vid väldigt höga frekvenser reagerade mörten genom att vilja avlägsna sig från ljudkällan. Det varierar dock mycket mellan olika arter av fisk hur bra hörsselförmåga de har. Detta småskaliga experiment ger alltså inte en helt säker bild om hur fiskar reagerar på ljud från vindkraftverk men det visar iallafall att det troligen inte kommer att vara något som neutraliserar de starka positiva reveffekterna (Öhman 2005).

8.5.5.3 *Orienteringspåverkan på fisk – elektromagnetiska fält*

Eftersom själva generatoren och alla andra större elektriska komponenter i vindkraftverk sitter längst upp så finns det ingen stor risk att dessa skulle orsaka problem för fiskar utan det är själva kablarna till fastlandet som är relevanta för undersökning. Situationen är alltså precis densamma som för vågkraftverk. Några exempel på fiskar som är speciellt känsliga för elektromagnetiska fält är hajar och rockor, men också delfiner och valar har visat att de kan använda jorden magnetfält för att navigera. Studier som genomförts har dock inte gett några tydliga resultat om fiskar påverkas tillräckligt mycket för att kablar ska innebära problem för deras ekosystem. De studier som gjorts visar att reveffektens attraktionskraft är större än eventuell påverkan av elektromagnetiska fält (Bergström *et al.* 2022).

8.5.5.4 *Sjöfåglar och fladdermöss*

De huvudsakliga farorna med vindkraft för fåglar är risken att fåglarna kolliderar med dem. Få studier har utförts och det är svårt att få exakta data då det är lätt att missa enstaka kollisioner. Trots denna risk för mörkertal så är det dock väldigt

osannolikt att detta skulle vara något som påverkar en hel populations antal på lång sikt. I Danmarks vindparker Horns Rev och Nysted har man kollat på fågelpopulationer och funnit just detta, att det inte har skett några signifikanta ändringar i antal fåglar. Det är trots allt rent osannolikt att en fågel träffar den relativt lilla ytan vingarna täcker jämfört med hela rotordiametern om inte sikten är väldigt dålig och fågeln lockas mot kraftverket av lampor. Det beror dock mycket på vart man sätter parken, om man bygger en park mitt i ett område där många flyttfåglar flyger så är såklart risken högre. Fladdermöss kan också påverkas av detta på liknande sätt eftersom de också har stråk de ofta håller sig till vid migration. Det samlas ofta insekter nära verken vilket gör att fladdermöss som flyger förbi kan vilja stanna och jaga föda. De kan också stanna enbart för att vila sig. Detta leder till vissa risker för kollisioner. Åtgärder som kan tas är för det första att inte bygga parker där många djur migrerar. Detta är en viktig förebyggande åtgärd men det finns också tankar om metoder att stanna verken i perioder då det är extra mycket djuraktivitet. (Wind energy- THE FACTS uå., Ahlén et al 2007)

8.5.6 Är många små verk bättre än få stora?

Det är svårt att säga vad som är bäst. Ur energisynpunkt så brukar det vara mer effektivt med så stora kraftverk som möjligt då dessa nästan alltid blir har större effekt per materialanvändning. Ur perspektivet habitatförändring är det inte lika självklart, man kan utgå från att ljudpåverkan och elektromagnetiska fälten inte kommer skilja sig så mycket mellan parker med stora verk jämfört med små verk. Då är det alltså bara storleken på fundamenten som kommer variera. Om man för enkelhetens skull antar att det är cylindriska fundament kan man enkelt räkna ut att fundament med mindre diameter kommer ha större ytarea sett till arean på genomskärningen. För att maximera ytan tillgänglig för artificiellt rev är det alltså fördelaktigt att ha flera stycken mindre kraftverk. Man kan dock fråga sig om det är någon fördel att varje enstaka fundament har så stor yta som möjligt, i så fall skulle ju det tala för att det är bättre med större verk. Vissa parker där fiske förbjuds helt och hållet får ju samma funktion som ett reservat. Om en viss vindpark ska få ett sådant förbud eller inte kan bero delvis på arean på det aktuella området samt på storleken på själva verken. Fåglar kan ibland se vindparken som öar som är lämpliga att landa och vila på och här kan också storleken på enstaka verk spela in.

8.6 Landbaserade vindkraftverk

8.6.1 Effekter av vindkraftverk vid placering i fjällen

8.6.1.1 Rennäring

Vid etablering av vindkraft inom ett renskötselområde krävs noggrann planering och projektering, detta för att man vill minimera påverkan på rennäringsen. I studier som utförts vid uppförande av vindkraftparker på fjällen Storliden och Jokkmokksliden i Västerbotten ser man tydligt att renen undviker dessa fjäll både under själva byggnadsfasen och efteråt. Anläggning av vindkraftsanläggningar medför

nästan alltid en koncentration av vägar, transformatorstationer samt kraftledningar inom ett väldigt litet område.

Själva vindkraftparker är i fjällen ofta belägen på hög höjd medan tillhörande infrastruktur går igenom dalar och annan låglänt terräng. Detta riskerar då att störa och skära av renarnas naturliga vandringar mellan betesmarkerna. Man har i studier tydligt sett att renar tenderar att undvika platser som den associerar med så kallad kontinuerlig störning, dvs. byggnader, vägar och dylikt. Här undviker renen inte bara själva platsen för störningen utan den låter även bli att beta inom en radie av minst 2 km från platsen. När man planerar vindkraftsparker i fjällen är det därför viktigt att inte bara ta hänsyn till själva verkens placering utan också hur deras infrastruktur kan anläggas på ett sätt som inte stör renarnas vandringar. Man har märkt att åtgärder för att hjälpa renarna att hitta tillbaka till tidigare brukade områden ofta är väldigt effektiva. (Skarin *et al.* 2013)

Problemet är att det idag saknas lämpliga metoder för att värdera renbetesmark. Det finns information om hur närliggande samebyar använder olika områden i form av något som kallas "rennäringens riksintressen". Man har generellt en förmåga att uppfatta mark som inte är av riksintresse eller omfattas av skydd som ointressant ur rennäringssynpunkt. Så är dock inte fallet. Rennäringens nyttjande av betesmarker är, till skillnad från nötkreaturens, väldigt dynamisk. Det innebär att den skiljer sig från år till år beroende på klimat, rovdjursförekomst etc. Det är därför svårt att säga att ett visst område är ointressant ur rennäringssynpunkt baserat på bara ett par års observationer. När man planerar vindkraftsparker är det därför viktigt att lämna även icke frekvent nyttjade områden orörda så att renarna ges utrymme att byta betesmarker från år till år (Skarin *et al.* 2013).

8.6.1.2 Fåglar

Man har upptäckt att vissa fågelarter gillar att häcka inom området för vindkraftparker. Andra arter missgynnas dock av att ha vindkraftverk i närheten. Man rekommenderar t.ex. ett skyddsavstånd på minst 1 km från fjällgåsens häckningsplats. Detta baseras dock inte på någon egentlig forskning om att vindkraft stör häckningen utan motiveras med att fjällgåsen klassas som akut hotad. Eftersom dess enda kända häckningsplats inom EU är just den svenska fjällvärlden och det är därför är viktigt att värna om dessa områden (Rydell *et al.* 2017).

Generellt är det svårt att göra noggranna studier på fåglars beteendemönster inuti och runt omkring vindkraftparker. Kungsörnar i fjällen har observerats flyga på onormalt höga höjder när de närmar sig vindkraftparker (Navinder *et al.* 2017). Då de förflyttar sig över långa sträckor bidrar utbyggda vindkraftparker till en ökad kollisionsrisk för örnarna. Man har även märkt att vindkraftverkens lokalisering ofta ligger nära biotoper som örnarna föredrar (Navinder *et al.* 2017). Detta tillsammans med att örnarna flyger högre över vindkraftverken visar på att man måste beakta detta när man planerar att anlägga ny vindkraft för att inte stressa örnarna i onödan.

Vid en kartläggning av det samlade fågellivet vid Oldfjällen i Jämtland märkte man att unga kungsörnar har en tendens att stanna kvar omkring sin födelseplats under de första månaderna av sitt liv vilket i detta fall innebar att de inte lät sig avskräckas av vindkraften som placerades på fjället (Falkdalen *et al.* 2013). I många fall höll de sig dock så nära vindturbinerna att de riskerade att kollidera med dessa. Då unga kungsörnar återvänder till sina födelseplatser under andra och tredje sommaren av sina liv löper de en återkommande risk att kollidera med vindkraftverken. Generellt har man märkt att framförallt rovfåglar och hönsfåglar löper en ökad risk att kollidera med vindkraftverk då dessa tenderar att flyga i samma höjd som rotorbladen. Under hela undersökningen vid Oldfjällen märktes en signifikant nedgång i antalet fågelrevir efter uppförandet av vindkraftparken jämfört med innan (Falkdalen *et al.* 2013). De tydligast drabbade arterna var smålom och dalripa. Man märkte också av en minskad närvaro av större flockar av fågel i området. Vid regelbunden undersökning av marken under vindkraftverken med hund hittades ca 10 säkra kollisionsoffer under ett drygt års tid (*ibid.*).

8.6.1.3 Däggdjur

Enligt Helldin *et al.* (2012) påverkar utbyggnaden av vindkraft de vilt levande däggdjuren mer i fjällen än i redan störningsutsatta områden som t.ex. jordbrukslandskap. Då det finns lite litteratur i detta ämne väljer man att peka på andra närliggande områden där det finns bättre och fler studier gjorda. Enligt rapporten kan det inte uteslutas att anläggandet av vindkraft har påverkan på större rovdjur och klövvilt. Det är sedan tidigare väl känt att störningar från mänsklig aktivitet vid fiske, friluftsliv och jakt påverkar älg, hjort, björn etc. och det är därför logiskt att tro att detsamma gäller vid byggnation och service av vindkraft. Då vindkraftsutbyggnaden i framtiden väntas ske i mera avlägsna skogsområden kan risken bli att det förstör de naturliga habitat för större däggdjur som finns där idag. Detta skulle sedan kunna få effekter på populationen av dessa arter.

Infrastruktur till och från vindkraftsparkerna tycks dock inte avskräcka större däggdjur särskilt mycket och skulle till och med kunna gynna vissa av dem. Dels då dessa ibland tenderar att använda vägarna för bättre framkomlighet, dels då vägranterna innebär ökade betesmöjligheter och bättre framkomlighet för djuren. Bullret från vindkraftverken kan, enligt de få studier som finns på detta ämne, störa de stora däggdjuren en kort period. Mycket tyder dock på att tillvänjningen är snabb och att det därför handlar om en begränsad störning. Man kan dock sammanfatta det hela med att de stora däggdjuren blir störda vid uppförandet av vindkraft och den ökade mänskliga närvaro som det innebär men att mer forskning krävs innan man med säkerhet kan säga hur störda djuren blir och i vilken omfattning de blir det (Helldin *et al.* 2012).

8.6.2 Effekter av vindkraftverk vid placering i skogs- och jordbrukslandskap

8.6.2.1 Hälsoeffekter hos människor

Då vindkraftverk inte medför några direkta utsläpp vid drift kommer de inte påverka människor i form av partikelutsläpp som skulle kunna medföra hälsorisker. Istället kommer de direkta påverkans effekterna främst från oljud. Argument skulle även kunna föras runt det faktum att vindkraftsturbiner förändrar landskapets utseende på ett negativt sätt, men detta är individuella åsikter som inte borde påverka någon. Det är snarare en fråga om vana precis som all annan typ av konstruktion. Oljud kan påverka hälsan hos människor som lever nära vindkraftverk. Hälsan påverkas exempelvis genom sömnbrist och koncentrationssvårigheter. Nivån av påverkan varierar beroende på naturen av ljuden och styrkan mätt i decibel.

Ett flertal undersökningar har genomförts som testar hur människor påverkas om de utsätts för ljud från vindkraftverk. Ett trettiotal av dessa sammanfattades av Naturvårdsverket som försökte ta reda på till vilken grad människor påverkas av ljud från vindkraftsturbiner (Pedersen *et al.* 2010). Dessa utfördes genom att människor som bor i närheten av vindkraftverk i olika områden och avstånd fick dokumentera påverkan. Deltagarna i studien fick skriva ner sin uppfattning av ljuden i en dagbok och reaktionerna studerades i jämförelse med vilken ljudnivå vindkraftverket hade under tiden. Tydligt var att fler märkte ljuden då ljudnivån från vindkraftverken var hög, något som stämde oavsett hur ofta deltagarna befann sig utomhus. Dessutom påstod sig fler höra ljuden när elproduktionen gick upp. Resultaten visade även att deltagarna kunde höra ljuden även när vindhastigheten ökade, något som förväntades maskera ljudet. Om högre vindhastighet maskerade ljudet eller inte gick inte att fastställa med hjälp av långvariga mätningar av ljudnivån 550 meter från en turbin. Detta utesluter dock inte att ljudutbredningen påverkas under olika meteorologiska förutsättningar. Studien visade att andelen som störs av ljuden ökar när vindkraftverken är synliga från hemmet. Terrängen gav ingen påverkan på ljudutbredningen men fler bebodda i jordbrukslandskap rapporterade störningar från ljuden. (Pedersen *et al.*, 2010)

8.6.2.2 Fåglar och däggdjur

Fåglar. Genomsnittsdödligheten per vindkraftverk i Sverige ligger på mellan fem och tio per vindkraftverk och år. Vindkraftsverkets placering har betydelse och vissa verk har upp till 60 kollisioner med dödlig utgång per år. Högst dödlighet är nära våta miljöer som kustnära, t.ex. vid Näsudden på Gotland. Fågeldödligheten är större vid större vindkraftverk. Men mätt som dödlighet per producerad mängd el minskar dödligheten för större kraftverk, vilket minskat dödstaten när många mindre bytts ut mot ett fåtal större vid Näsudden. (Rydell *et al.* 2017)

Alla fåglar drabbas. De flesta som drabbas är småfåglar. Rovfåglar, måsar, trutar och hönsfåglar drabbas mer i förhållande till sin populationsstorlek medan svanar,

gäss och tranor sällan krockar med vindkraftverk. De undviker starkt vindkraftverken. Fåglar som befinner sig nära vindkraftverk under en längre tid, som under häckning, övervintring eller rastning i samband med flyttning drabbas i större utsträckning än arter som bara passerar tillfälligt. De arter som kan få sina populationsstorlekar minskade pga vindkraft är främst rovfåglar som glador, ormvråkar och örnar. I sydligare länder även gamar. (Rydell *et al.* 2017)

Åtgärder för att minska negativa effekter av vindkraftverk på fåglar handlar om att undvika att bygga verk på särskilt fågelrika platser. Att ta fram skyddsavstånd till särskilt områden med större rovfåglar. För redan befintliga verk är det svårare att anpassa driften. Tillfällig avstängning som fungerar i vid vissa verk på några platser i världen, är troligtvis inte lika enkla att få en effekt av i Sverige. I vissa fall föreslås kompensationsåtgärder på annan plats, t.ex. häckningsträd, något som är vanligare internationellt än i Sverige. (Rydell *et al.* 2017)

Fladdermöss. Tidigare var kunskapen om hur fladdermöss påverkas av vindkraft bristfällig. Nya studier har visat att vindkraft är ett större problem för dem än vad man tidigare trodde. Nya metoder för att begränsa skador på fladdermöss har börjat utvecklas och testas. Att vindkraft är ett större problem för fladdermöss än för fåglar beror både på att fler fladdermöss dödas, men också på att det är ett fåtal arter som dödas vilket påverkar deras bestånd kraftigt. Dessa högriskarter av fladdermöss har svårt att kompensera dödligheten med ökad reproduktion. Bra metoder att beräkna fladdermössens populationsstorlekar saknas tyvärr både i Sverige och internationellt. Det finns farhågor att flera fladdermusarter redan påverkats negativt av vindkraft i Europa och Nordamerika. Fladdermöss söker upp vindkraftverk aktivt, troligtvis för att de rör upp insekter, vilket gör att problematiken är delvis annorlunda än för fåglar. (Rydell *et al.* 2017)

Åtgärder för att minska risken för högriskarter av fladdermöss är att anpassa driften av de vindkraftverk som ligger i dessa områden, oftast nära kusten. Fladdermössen flyger endast i svag vind och även koncentrerat till flyttning under hösten och 60-90 % av olyckorna kan undvikas på detta sätt utan särskilt mycket elproduktionsförlust. (Rydell *et al.* 2017)

Landlevande däggdjur. Den påverkan vindkraftverk har på däggdjur i skogs- och jordbrukslandskap är främst från fragmentering av habitat. Fragmentering sker när vägar byggs för att ge framfart för fordon och transporter till platsen där vindkraftverket ska konstrueras. Konstruktionen av vindkraftverk kräver vägar med breda och stora kurvor för att transport av de långa rotorbladen. Påverkan sker då oftast mot smådjur i form av hinder och kan vara av betydande grad. Fragmentering kommer ske i större grad på de platser där marken hittills varit oexploaterad och kommer alltså oftare gälla i skogar längre bort från tätbebyggda områden som redan har vägar som utgör hinder för djur. (Molander *et al.* 2010)

8.7 Koppling till svenska och globala mål

8.7.1 Svenska miljömålen

Följande mål kopplar till vind- och vågkraft:

Begränsad klimatpåverkan. Mängden växthusgaser i atmosfären ska stabiliseras på en nivå som innebär att människans påverkan på klimatsystemet inte blir farlig. Förbränningen av fossila bränslen måste minska för att klara detta mål och ett sätt att göra detta är att elektrifiera stora delar av dagens samhälle. En omställning till ren och förnybar energi blir då också ett krav i och med att de fossila bränslena ska skäras ned. Även en ökad framtida produktion av elektricitet måste säkerställas för att kunna möta det framtida behovet i ett elektrifierat samhälle. I och med problematiken ovan behövs både mer av befintliga tekniker och nya sätt att producera förnybar el, exempel på sådana är våg- och vindkraft.

Ett rikt växt- och djurliv. Att skapa ett rikt växt- och djurliv handlar om att bevara och nyttja den biologiska mångfalden på ett hållbart sätt samtidigt som arternas ekosystem måste värnas. Våg- och vindkraften kan ha stor inverkan på detta mål både för växt och djurlivet då uppförandet av dessa förnybara energikällor leder till artificiella rev vilket gör att både den biologiska mångfalden och den totala biomassan i området ökar. Förutom detta så bildar våg- och vindkraftsparkerna också en sorts "frizon" för fiskar och skaldjur eftersom kraftverken och strukturen kring dessa omöjliggör för yrkesfiskarna att fiska i området. Det här leder till att olika bestånd kan få en chans att växa vilket är mycket bra för dagens överexploaterade hav.

Hav i balans samt levande kust och skärgård. Våg- och havsbaserad vindkraft bildar båda artificiella rev och har därför till stor del samma fördelar för vattenlevande djur och växter. För fåglar och fladdermöss kan dock vindkraftsparkerna ha negativ effekt eftersom dessa djur kan flyga in i turbinerna. Det är därför väldigt viktigt att undvika att bygga vindparker i områden med mycket migrerande djur. Smart placerade vindkraftverk kommer inte att utgöra någon större risk för fåglar än en vanlig byggnad men placerar man dem i områden med mycket fåglar och fladdermöss så kommer de ha negativ påverkan på flygande djur.

Storslagen fjällmiljö. I fjällen finns många natur-och kulturvärden som är viktiga att bevara. Fortsatt renhållning anses viktig för att bevara ett vidsträckt och betespräglat fjällandskap vilket skapar livsmiljöer för många arter. Vindkraftsutbyggnad i fjällvärlden bidrar till att störa renarna och nybyggnation måste därför göras med omsorg. Även andra däggdjur och fåglar störs av vindkraften och det är därför viktigt att man tar detta i beaktande när vindkraftsparker projekteras.

God bebyggd miljö. I målen för god bebyggd miljö ingår en strävan till bostäder som inte medför några hälsoproblem. Dessa skulle kunna komma från

oljud skapade av vindkraftverk och det är därmed viktigt att planera placering av vindkraftverk, alternativt att ljudsäkra bostäder som befinner sig eller som kommer konstrueras nära vindkraftverk.

8.7.2 FN:s globala mål

Följande mål kopplar till vind- och vågkraft:

Mål 3 God hälsa och välbefinnande. För att garantera möjligheten för god hälsa och välbefinnande är det viktigt att begränsa vind- och vågkraftverkens direkta hälsopåverkan. Den största påverkan från dessa ligger hos vindkraftverkens ljud som kan ge negativ effekt hos människor som bor nära vindkraftverk vilka kan få problem med sömn och stress. För att undvika detta är det viktigt att noggrant undersöka vilken effekt dessa ljud har på olika avstånd från bebodda områden och sedan utifrån det planera var vindkraftverk placeras.

Mål 6 Rent vatten och sanitet. Målet att öka vattenkvalitén kräver att dumpning av avfall, utsläpp av kemikalier och att mängden obehandlat avloppsvatten minskar. Produktionen av våg- och vindkraft leder till utsläpp av kemikalier eftersom de kräver material framtagna i gruvor utan strikt reglerade principer för hur avfallet ska omhändertas. För att säkerställa att vattenkvalitén inte bortprioriteras framför andra miljömål krävs att de som producerar våg- och vindkraft ställer krav på underleverantörer att hantera sina utsläpp bättre. Eftersom trenden just nu är att tekniker vilka involverar sällsynta jordartsmetaller blir vanligare går det inte nödvändigtvis att byta leverantör eller leverantörsland vilket minskar möjligheten för att åtgärda detta problem.

Mål 7 Hållbar energi för alla. Här spelar våg- och vindkraft en avgörande roll då dessa bidrar till att öka mängden förnybar energi i den samlade energimixen. En ökad utbyggnad av dessa energislag är därför eftersträvansvärd så länge det inte sker på bekostnad av de andra miljömålen.

Mål 8 Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt. Anständiga arbetsvillkor är ett mål som ofta är kopplat till länder med en fattigare befolkning. Sedan våg- och vindkraft börjat använda sig av mer sällsynta jordartsmetaller har beroendet av import från framför allt Kina ökat. Rapporter visar att arbetare i kinesiska gruvor kommer till skada till följd av att de bland annat hanterat radioaktiva material utan skydd. I väntan på nationell lagstiftning som kan åtgärda detta finns inget för beställarna att göra annat än att välja annan teknik, eller ställa krav på underleverantörer vilket kan vara svårt eftersom Kina har sin "nästan monopol"-ställning.

Mål 12 Hållbar konsumtion och produktion. Vad gäller hållbar industri och produktion finns det orosmoln för hur utvinningen av många metaller ska kunna fortsätta i den takt de utvinns idag. Våg- och vindkraft använder en del metaller som faller inom denna oro. Vare sig oron är välgrundad eller inte gällande de metaller som används för våg- och vindkraft borde mer material återanvändas.

Mål 14 hav och marina resurser. Våg- och havsbaserad vindkraft har både positiva och negativa effekter på havets fiskresurser. Till exempel är för- mågan att skapa artificiella rev är en stor fördel för lokalt djurliv. För yrkesfiskare är det dock delade meningar, även fast det inte är omöjligt att fiska innanför vindkraftparkerna så blir åtkomligheten självklart sämre och risken för olyckor ökar vid oväder och dålig sikt. Parkerna skapar alltså områden med mycket fisk men gör samtidigt så att de är svårare att komma åt. Modulerna i vågkraftsparkerna är placerade mycket tätare än havsbaserad vindkraft och den kringliggande infrastrukturen gör det omöjligt att bedriva fiske i området.

Mål 15 ekosystem och biologisk mångfald. Både våg- och havsbaserad vindkraft bidrar till en ökad biologisk mångfald i och med införandet av nya strukturer i vattenmassorna. Där trivs många olika nya arter och artificiella rev som tidigare beskrivet bildas. Det här är till stor fördel för den biologiska mångfalden och även biomassan i området ökar. Dock så kan byggnationen av verken förstöra vissa naturliga livsmiljöer, vilket gör det mycket viktigt att undersöka platserna innan där bestäms att bygga om man vill klara målet. På samma sätt kan den biologiska mångfalden i fjäll- len ta skada av byggnation av vindkraftverk. Den biologiska mångfalden är i många fall beroende av att renarna långsamt betar av stora områden. För att detta ska kunna ske är det viktigt att lokaliseringen av vindkraft- verken planeras med omsorg så att det inte stör renarna i onödan. Då re- narna inte vill gå nära vindkraftverken får man räkna med att områdena runt vindkraftverken inte betas och således går miste om den biologiska mångfald som renbete bidrar till. Även andra djurarter, som fåglar och större däggdjur, påverkas negativt av vindkraftsutbyggnad i fjäll- len och detta kan i sin tur bidra till både minskad biologisk mångfald och rubbade ekosystem.

8.8 Instuderingsfrågor

- Gruvdriften för att ta fram sällsynta jordartsmetaller är förknippad med stor miljöpåverkan. Hur påverkas både den lokala och globala miljön påverkas av denna industri?
- Förklara kort vilka som är de största orsakerna till minskad effekt i vindar och vågor, och varför.
- Nämn två positiva och två negativa effekter vågkraftverk kan ha på närlig- gande växt- och djurlivet.
- Vad finns det för fördelar med att det inte går att fiska runt och i våg- kraftsparker och vad finns det för motsättningar till detta?
- Nämn två olika typer av pålning till havs och en metod för hur ljudsprid- ning från dessa kan minimeras.
- Vilka miljökonsekvenser kan sedimentering leda till?
- Hur påverkas fladdermöss av vindkraftverk?
- Hur påverkas fåglar av vindkraftverk?

- Hur kan man minimera riskerna för att fåglar och fladdermöss ska flyga in i vindkraftverk?
- Vilka är de huvudsakliga för och nackdelarna med vindparker för fiskare?
- Nämn några nackdelar och någon fördel som de stora däggdjuren får av vindkraftsutbyggnad i fjällen?
- Hur påverkar vindkraftverkens synlighet från bostäder hur människor uppfattar deras ljud?
- Vilka är riskerna för fåglar och fladdermöss när det gäller vindkraftverk?

9 Solkraft, geotermisk energi och energilagring

Solen är en energikälla som börjat utnyttjas direkt i allt större utsträckning under de senaste årtiondena. Tack vare teknisk och ekonomisk utveckling har solinstrålningen blivit en gångbar källa till elektrisk energi. Solinstrålningens periodicitet utgör dock ett dilemma: implementering av solceller i stor skala följs av ett behov att kunna lagra energi. I det här kapitlet utforskas vilken teknik som finns för att omvandla solinstrålningen till elektrisk energi, och vilken teknik som finns för att lagra energi från sol och andra intermittenta energiskällor.

Solenergi är förnybar men innebär ändå en viss miljöpåverkan att använda som energikälla; råvaror måste utvinnas, produktionsprocessen kräver energi och tekniken innehåller ofta giftiga ämnen. Detsamma gäller för energilagringstekniken. Därför tas även miljöpåverkan upp här - vad har råvaruutvinningen för betydelse för miljön, vilka giftiga ämnen kan tekniken innehålla, vad händer med avfallet och vad kan göras åt detta?

I detta kapitel undersöks även geotermisk energi och vilka effekter dess användning kan ha på miljön.

9.1 Solceller

Tekniken bakom en solcell bygger på att ta tillvara på tillförd strålningsenergi från solljus. Solcellen utgörs av ett halvledarmaterial, exempelvis kisel. För att en solcell ska fungera måste det finnas fria elektroner i cellen samt möjligheter för dessa att bindas i elektronhål. Därför anpassas halvledarmaterialets egenskaper med hjälp av dopning. Vid dopning tillsätts atomer med fler eller färre valenselektroner i sitt yttersta skal än halvledarmaterialet. Beroende på vilken atom som tillsätts så kommer de två plattorna i cellen att få en negativ eller positiv laddning. Dessa kallas n-skikt respektive p-skikt.

Vid tillförsel av energi från solljusets fotoner exciteras elektroner från halvledarmaterialet. De exciterade elektronerna kommer attraheras av skiktet med negativ laddning samtidigt som elektronhålen kommer attraheras av det positiva skiktet vilket medför att en spänning uppstår (Sidén 2015).

9.1.1 Typer av solceller

Halvledare bestående av kisel är den vanligaste typen av solceller. **Kiselsolceller** på marknaden har en verkningsgrad på omkring 19 %. Kisel finns inte i fri form i naturen, utan förekommer i föreningar med syre och olika typer av metaller i bergarter som granit och gnejs eller jordarter såsom sand och lera. (Tsoutsos *et al.* 2005, Sherwani *et al.* 2010). I solcellen kan kisel endast användas i rent kristallin

form. Framställning av ren monokristallin kisel medför att kisel måste renas och förädlas vilket är en energikrävande och dyr process (Sidén 2015).

Tunnfilmssolceller är en annan vanlig typ av solceller. Tekniken bygger på att en tunn film av fotovoltaiskt material appliceras på ett substrat av plast, glas eller metall. Det finns fyra olika typer av tunnfilmssolceller. Den första består av amorft kisel, som produceras från en gas av kisel, väte och doppingämne. De har en verkningsgrad mellan 4 och 6 %. Förutom tunnfilm av amorft kisel finns CIGS (står för koppar, indium, gallium, selen), CdTe (kadmium, tellur) och GaAs (gallium, arsenik). CIGS-solceller forskas det bland annat om på Uppsala universitet, där man lyckats uppnå en verkningsgrad på 22,6 % (Nohrstedt 2017). Tunnfilmssolceller är på grund av de tunna skikten som används, materialsnålare än kristallina kiselceller. Däremot har celler med amorft kisel en lägre verkningsgrad än vanliga kisel-solceller (Sidén 2015).

Förutom kiselceller och tunnfilmssolceller finns ett flertal typer av solceller under utveckling. Ett exempel på detta är **nanosolceller** som är uppbyggda av tunna nanotrådar. Nanotrådarna består av det halvledande ämnet indiumfosfid. En nanotrådssolcell har en verkningsgrad på omkring 14 % och ger flera gånger mer effekt per ytenhet än kisel-solceller (Lindgärde 2013). Ett annat exempel är **perovsolceller** som består av perovskit. Perovskit är ett mineral (CaTiO_3) och i kontext med solceller så inbegriper benämningen perovskit olika typer av material som har perovskitens kristallliknande struktur.

9.1.2 Råvarutillgång och miljöpåverkan

Kisel finns i flera former i naturen och är inte en vara det råder brist på. Utöver den energiintensiva process som krävs vid rening av kisel-solceller, används även **metallerna** koppar, silver, bly, tenn, samt olika **dopningsmaterial** vid produktionen. Framställning av koppar och silver medför malmbrytning och metallproduktion som båda är processer med stor miljöpåverkan (Naturvårdsverket 2009). Särskilt utsläpp i form av lakvatten från slagghögar som innehåller dessa metaller kan vara omfattande.

Tunnfilmssolcellerna består till stor del av **plast** och olika **metaller** såsom kadmium, indium, gallium och tellur. Kadmium är en tungmetall som utvinns från jordskorpan. I genomsnitt finns 0,2 gram kadmium per 1000 kg, och ämnet finns således endast i små mängder. Tunnfilmssolcellerna liksom flera andra typer av solceller innehåller dessutom koppar. Metallproduktion av främst koppar och zink är en av de största orsaker till utsläpp av kadmium i luften och står för cirka 38 % av det totala utsläppet av kadmium (Wängberg 2014).

Kadmium är giftigt och kan skada människor och djur. Vid hög exponering av kadmium kan njurarnas förmåga att rena blodet från olika nedbrytningsprodukter minska. Kadmium kan öka risken för benskörhet redan vid låg exponering. Exponering vid graviditet kan komma att påverka fostrets tillväxt och kognitiva utveckling i framtiden (Persson 2017). Den största exponeringen av kadmium vi

utsätts för i Sverige är dock från maten då grödor lätt tar upp detta ämne som är vanligt i många jordtyper (Naturvårdsverket uå).

Gallium är ett vanligt metalliskt grundämne med en medelhalt på 15 ppm i jordskorpan. Trots detta betraktas gallium som sällsynt då det endast produceras som biprodukt vid brytning av bauxit och zink (Sveriges Geologiska Undersökning 2016a).

Indium är ett vanligt ämne i jordskorpan. Utvinningen av indium är liten och ämnet bryts endast som biprodukt vid annan brytning, vanligtvis zink. Medelhalten av indium i jordskorpan förväntas vara 0,25 ppm. Indium kan effektivt återanvändas genom återvinning (Sveriges Geologiska Undersökning 2016b).

Tellur är ett toxiskt halvmetalliskt grundämne. Tellur förekommer i jordskorpan med en medelhalt på 0,002ppm. Metallen förekommer både i naturlig form som kristallin tellur, men även som tellurider i guldmineral.

Solcellers miljöpåverkan under drifttiden är liten. Underhåll av solceller inkluderar rengöring samt transport till och från utsedd plats. En möjlig miljöpåverkan under drift kan vara läckage av de toxiska ämnena hos tunnfilmssolceller om dessa går sönder. Dock är kadmium i föreningen CdTe stabil och olöslig i vatten vilket medför att risken för läckage av kadmium är liten (Alsema *et al.* 2006).

9.1.3 I vilka områden är det optimalt för solceller?

Globalt sett finns de bästa områdena för solenergi i torra områden nära ekvatorn, med ren luft och minimalt med skuggning, som ökenområden i Chile, Bolivia, Namibia, Jordanien och Egypten (Rodríguez 2021). Instrålningsvinkeln påverkar den totala mängden solinstrålning. Den totala instrålningen inkluderar direkt och diffus strålning. Global instrålning är den totala horisontella instrålningen. Strålningseffekten, dvs. den strålningsenergi som träffar jorden mäts i kilowattimmar per kvadratmeter (kWh/m²). I områden med flest soltimmar i världen förväntas ett värde på upp till 3400 kWh/m² per år. I Sverige är det som mest ca 1000 kWh/m² på Gotland och nära Vänern, medan fjällkedjan bara når 750 kWh/m². Intressant är att de kartor som produceras för internationell användning (t.ex. från The World Bank: Global Solar Atlas 2.0) bara visar området söder om 60°N, dvs. strax norr om Uppsala, för att man anser att det inte är intressant med solenergi i stor skala längre norrut.

9.2 Solkraftverk – termisk solkraft

I ett solkraftverk koncentreras energi för att kunna producera ånga. Ångan kan i sin tur driva en ångturbin och generera el. Det kallas också termisk solkraft eller CSP för Concentrated Solar Power. För att uppnå koncentrationen av solenergin används speglar som reflekterar solljuset så att strålningen fokuseras till en viss

punkt, till exempel ett rör. I rörets tillsätts olja som hettas upp och sedan kan koka vatten till ånga via en värmeväxlare.

Eftersom solkraftverk endast kan producera el vid solljus är de flesta solkraftverk idag i ett hybridutförande med ett reservbränsle som till exempel naturgas för extra generering av ånga och el (Sidén 2015). Trots detta är fördelen med termiska solkraftverk att dess elproduktion är stabilare än exempelvis elproduktionen vid användning av solceller. Detta eftersom att värme kan lagras. Termisk solkraft begränsas inte av brist på resurser på samma sätt som solceller, där exempelvis de sällsynta metallerna indium och gallium används vid produktion (Pihl *et al.* 2012).

Inom Europa är det främst Spanien som satsat på termisk solkraft med drygt 2300 MW installerad CSP i dagsläget. Detta på grund av Spaniens fördelaktiga väder då med flest soltimmar per år i Europa. År 2016 producerades 5 TWh el från CSP vilket motsvarar 1,9 % av landets totala elproduktion (International Energy Agency 2016). CSP-anläggningar uppförs även i Tyskland som då även utnyttjar dem till fjärrvärme med stora ackumulatortankar för värme (Björkman 2022).

9.2.1 Termisk solkrafts miljöpåverkan

Miljöpåverkan från ett solkraftverk inkluderar främst vattenförbrukning. Vatten används till flera steg i processen t.ex. för att producera ånga för att driva turbiner, för kylning, och för att rengöra speglar. *We et al.* (2014) beräknade att CSP-anläggningar använder 4000 liter vatten per MWh om kylningsteknik används. Ännu en aspekt som visat sig förekomma i högre grad i samband med uppbyggnad av solkraftverk är erosion. Konstruktion av ett solkraftverk medför byggnation, byggtrafik, urgrävningar etc. som kan komma att påverka det torra klimatet de ofta placeras i med risk för en ökad jorderosion (*Wu et al.* 2014). Jorderosion kan i sin tur skapa raviner eller slamma igen vattendrag vilket påverkar det lokala djurlivet.

9.3 Geoenergi och geotermisk energi

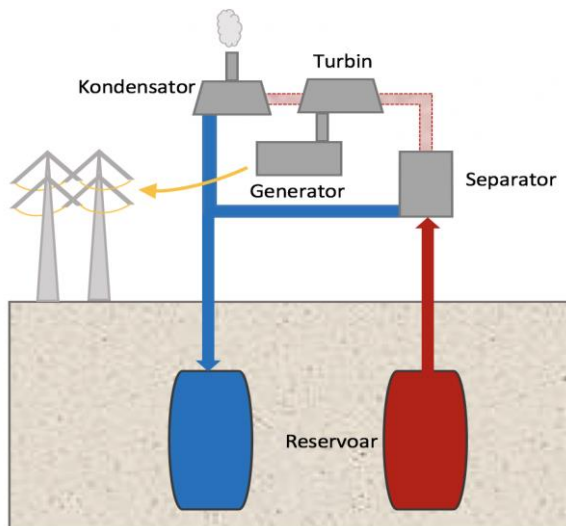
Solenergi kan via direktinstrålning, nederbörd och vind endast nå ner i de översta ca 10 m av marken (de lösa avlagringarna) och berggrunden. Solenergin når djupare i sjöar (ca 30 meter) eller haven (ca 200 m). Samlingsnamnet för den energi som kan tas ut från de ytliga delarna av marken (markvärme/jordvärme/ytjordvärme), sjöar (sjövärme) och de översta 100-400 m av berggrunden (bergvärme) kallas geoenergi eller förnybar geoenergi.

När energi tas från djupare lager i berggrunden kallas den för geotermisk energi. Energin kommer då främst från radioaktiva sönderfall i berggrunden och jordens inre. Jordens kärna har en temperatur på ca 5000°C, varifrån all värme transporteras mot jordens yta. Dessvärre är energiflödet vid jordytan för litet för att kunna utnyttjas för energiutvinning, med undantag för vulkaniskt aktiva områden, vilket Island är ett exempel på. Temperaturen stiger alltså med ökande djup i jordskorpan. Temperaturgradienten i jordskorpan (den s.k. geotermiska gradienten) är på Island

är 100-200°C/km medan Sverige har ett medeltal på 10-25°C/km. Vid utvinning av geotermisk energi är en temperatur på mellan 80-100°C vanligtvis aktuellt. I Sverige är det bäst förutsättning för utvinning av geotermisk energi i de mesozoiska sedimenten vilka är porösa sandstenslager som ligger på 400-800 m djup. Dessa finns främst i sydvästra Skåne. Vattnet i dessa sandstenslager har ca 22-gradigt vatten som används för fjärrvärme. Potentiella tillgångar har beräknats vara mellan 200-500 TWh (Wall 1997). Tar man ut energi från djupare lager i berggrunden (1-7 km djup, djupgeotermisk energi) ökar borrkostnaderna, men temperaturen på 6-7 km djup kan då vara 140-200 grader vilket ger möjlighet till elproduktion. Genom ny teknik har borrkostnaderna minskat och intresset för uttag av djuptermisk energi har därför ökat de senaste åren.

9.3.1 Användningsområden för geoenergi

Geoenergi används främst för uppvärmning av hus och lokaler, vattenuppvärmning och torkprocesser i industrier. Man kan använda geotermisk energi till elproduktion, men då är främst högtemperaturfält aktuella. Högtemperaturfält har en temperatur på 200-300°C (Wall 1997). Nedan, Figur 34, visas en principskiss på en modell av ett geotermiskt kraftverk som producerar elektrisk energi.



Figur 34. Principskiss på ett geotermiskt kraftverk där man pumpar upp hetvatten från en reservoar, låter vattnet ledas genom en separator där het ånga sedan leds genom en turbin som i sin tur låter en generator generera el. Ångan kondenseras och leds sedan till en kallvattenreservoar.

9.3.2 Miljöpåverkan vid geotermisk energiutvinning

Enligt Wall (1997) är miljöpåverkan vid geotermisk energiutvinning:

1. Buller. Främst under byggnation av anläggningen, då ett område med en diameter på ungefär 1 km kommer utsättas för buller som uppstår vid borrhningen i berget.

2. Vattenföroreningar kan uppstå om en rörledning går sönder eller om geotermalvattnet återinjiceras i ytligare berglager vilket kan innebära att grundvattnet förorenas.
3. Luftföroreningar. Vid användande av geotermisk ånga kan svavelväte förorena luften. Samma gäller för hetvatten om man inte använder sig av slutna system.
4. Seismisk aktivitet kan förekomma vid injicering av vatten i berggrunden, dock är risken mycket liten i Sverige. Seismisk aktivitet innebär rörelser i kontinentalplattorna
5. Sättningar. Kan förhindras om vattnet återinjiceras i produktionszonerna. Sättningar innebär kompression av underliggande jordlager vilket leder till att markytan sjunker.
6. Radioaktiva ämnen kan spridas om man hanterar heta bergsmassor som värmts upp genom sönderfall av radioaktiva ämnen. Dessa kan också urlakas då vattnet cirkulerar i berget. Man kan förhindra spridning av radioaktiva mineraler via exempelvis fjärrvärmevatten genom att använda en värmväxlare.
7. Värmeutsläpp kan bli ett problem eftersom endast ca 15-20% av energin omvandlas till elenergi.
8. Korrosionsproblem, då salthalten i geotermalvattnet är hög. Korrosion innebär att ett material löses upp genom en kemisk reaktion till en mer stabil form.

9.4 Lagring av energi

I takt med att fler utvecklingsländer idag tar sig ur fattigdomen ökar det globala energibehovet och energianvändningen. Utsläppen från dessa länder per person är dock mycket lägre än från dagens industriländer. Många pratar om en fördubbling av energianvändningen fram till 2050 och en ännu större ökning av elanvändningen. Sammantaget skulle världen behöva bygga ut koldioxidsnål elproduktion med nivåer på minst 300 kWh per capita och år (Davour *et al.* 2014).

Energilagring kommer att spela en central roll i det framtida samhället, då flera av de förnybara energikällorna är intermittenta. Tillvaratagandet av all möjlig energi är av yttersta vikt för att uppnå de uppsatta klimatmålen. Energilagring för senare användning skulle kunna göras med hjälp av så kallade energiackumulatorer för vilka metoderna är många och skiljer sig utifrån användningsområde och typ av energi. De brukar delas upp i två huvudkategorier, elektriska ackumulatorer och icke-elektriska ackumulatorer. De elektriska ackumulatorerna delas upp i tre huvudsakliga underkategorier: batterier, superkondensatorer och supraledande magnetiska ackumulatorer (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) där batterier är de som redan används i stor skala medan de två sistnämnda används i pilotskala. Även vätgas och bränsleceller fungerar delvis elektriskt. De icke-elektriska ackumulatorerna lagrar kinetisk eller termisk energi och omvandlar den till

elektrisk energi, t.ex. i pumpkraftverk, värmekraftverk, genom att lagra luft komprimerat eller genom svänghjul (Elliman *et al.* 2015).

En ackumulators huvuduppgifter är att lagra och tillföra energi. I ett elnät med många intermittenta kraftkällor, som sol- och vindkraft, skulle ackumulatorer kunna användas för att lagra överskottsenergin från dessa källor då efterfrågan är liten, t.ex. på natten. Ett exempel på detta är den befintliga pumpkraften, vilken nyttjar vindkraft för att pumpa upp vatten till en högre nivå, för att sedan vid behov omvandla vattnets potentiella energi till el via turbiner.

Alla typer av ackumulatorer delar egenskapen att de relativt snabbt kan tillföra energi till elnätet, inom gruppen kan man dela upp dem i långsiktiga och kortsiktiga. Skillnaden mellan dessa två benämningar är verkanstiden. Batterier kan exempelvis förse elnätet med en jämn ström under en längre tid, men inte särskilt hög högsta nivå medan kondensatorer kan förse nätet med stora mängder ström, men bara under en väldigt kort period. Dessa perioder kan vara så korta som några sekunder i fallet med kondensatorer. Verkanstiden för ett pumpkraftverk är betydligt längre (Elliman *et al.* 2015).

9.4.1 Elektriska ackumulatorer

9.4.1.1 Batterier

Det finns två huvudkategorier av batterier, primärceller och sekundära celler. Primärceller är celler i vilka det sker en spontan reaktion, sekundära celler är celler som behöver en extern strömkälla för att laddas, dock är kemin snarlik i de båda typerna. Det finns många undertyper av batterier, de vanligaste är dock:

- Nickel-Kadmium
- Natrium-Svavel
- Bly-syra
- Litium-jon
- Flödesbatterier

Samtliga fungerar enligt samma princip. Batteriet består av mindre celler som i sin tur består av fyra huvudkomponenter, en anod, en katod, en separator och en elektrolyt. Varje mindre cell delas upp i två halvceller, där båda halvorna innehåller någon form av elektrolyt och varsin elektrod. Den negativt laddade elektroden, anod, och den positivt laddade katoden, sammankopplade av en krets för elektronerna att färdas över. I cellerna sker en spontan elektrokemisk reaktion, en så kallad redoxreaktion (som bygger på metallers vilja och ovilja att släppa ifrån sig elektroner), där anoden oxideras (släpper elektroner) och katoden reduceras (drar till sig elektroner).

Nickel-kadmium, redoxflöde, avancerad bly-syra, litiumjon, natrium svavel – dessa är exempel på olika typer av batterier som finns på marknaden idag. Några av de viktigaste parametrarna för användbarheten för batteriet är urladdningshastighet,

urladdningsdjup (hur många % av sin totala kapacitet batteriet kan leverera) och hur många urladdningscykler den klarar av (Nordling *et al.* 2015).

Natrium-svavel-batterier är idag störst på marknaden med en marknadsandel på 23%. Som namnet avslöjar innehåller batteriet flytande natrium och svavel. Systemverkningsgraden i ett sådant batteri ligger på 80 % och den klarar av 4500 urladdningscykler. Energidensiteten är ca 60 Wh/kg och kostar ca 4500 kr/kWh år 2014 (Nordling *et al.* 2015).

Bly-syra är en annan välanvänd typ av batteri som används i stor skala tillsammans med småskalig eller förnybar, intermittent, energiproduktion. Till exempel har Bangladesh 3,5 miljoner hem med sol-batterisystem. Nya versioner av dessa batterier har förbättrade egenskaper med runt 2800 urladdningscykler, 50 % urladdningsdjup och en livslängd på 17 år (Nordling *et al.* 2015).

Litiumjonbatterier har högre energidensitet och urladdningshastighet jämfört med andra batterier på marknaden. Dessa batterier består av en rad olika kemiska sammansättningar, med olika egenskaper. Dock kan dess höga energidensitet, innehåll av syre och litiums brännbarhet göra att risken för brand är stor (Nordling *et al.* 2015). Litiumbatterier har en väldigt hög specifik energi i jämförelse med andra typer av batterier på upp till 170 Wh/kg (Pollet 2012).

Till skillnad från andra batterier använder sig **flödesbatterier** av flytande elektroder. Dessa elektroder kan placeras utanför battericellen vilket leder till att batteriet får en större lagringskapacitet och att batteriet får en längre livslängd jämfört med andra typer av batterier. (Nordling *et al.* 2015)

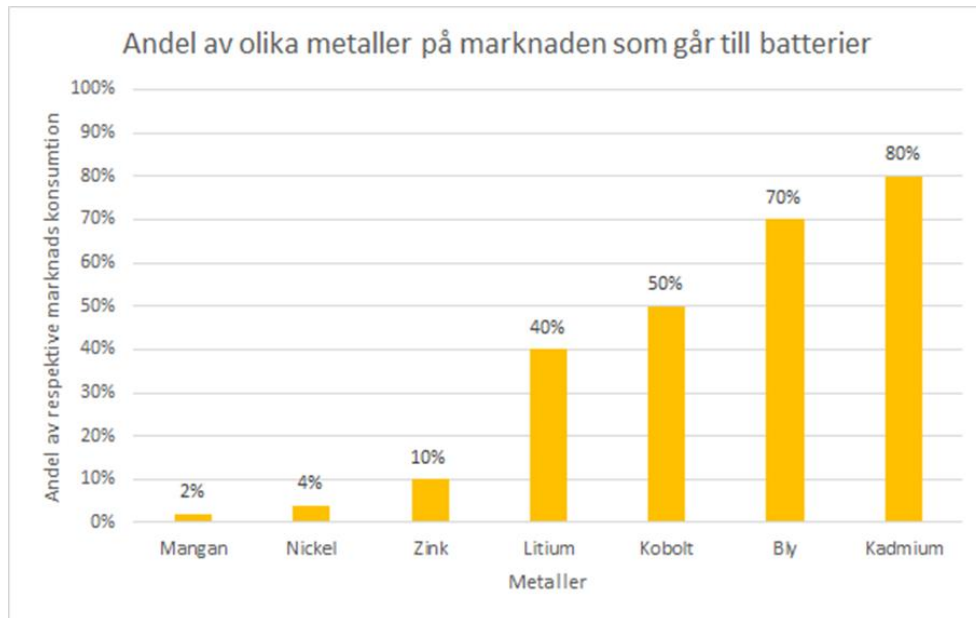
9.4.1.2 Metaller i batterier

Batterier kan innehålla många olika ämnen, inte minst ovanliga metaller. I vissa fall står batteriindustrin för majoriteten av efterfrågan för ett ämne. Exempel på detta kan ses nedan i Figur 35.

Nickel är en övergångsmetall, med atomnummer 28. Råvarutillgången av nickel är stor, ca 74 miljoner ton finns som tillgångar. Landet med den största tillgången är Australien 19 miljoner ton följt av Brasilien 12 miljoner ton. Dock står Filippinerna för den största produktionen av nickel från gruvor ca 440 tusen ton år 2014. Samma år var den totala produktionen från gruvdrift 2,4 miljoner ton. Den totala tillgången av nickelmalm, med en nickelhalt över 1 %, är ca 130 miljoner ton. Nickel förekommer huvudsakligen i latritjord men även i svavelmineral, men kan även förekomma i manganmalm. Bristen på nya svavelfyndigheter gör att gruvbolag tvingas att söka i nya territorier såsom Östafrika och subarktis (U.S. Geological Survey 2017).

Litium är en alkalisk metall, med atomnummer 3. Råvarutillgången av litium är ca 16 miljoner ton globalt där Chile har de största tillgångarna på 7,5 miljoner ton följt av Kina med 3,2 miljoner ton och Australien med 2,7 miljoner ton. Den största

produktionen av litium från gruvdrift är Australien med 18 700 ton, år 2017, följt av Chile med 14 100 ton. Den totala produktionen från gruvdrift år 2017 uppgick till 43 000 ton. Till följd av ny prospektering har den globala outnyttjade tillgången på litium ökat till 53 000 000 ton och återfinns främst i pegmatit (U.S. Geological Survey 2017).



Figur 35. Några av de metaller som i stor del går till batteriindustrin. Källa: Ekberg & Petrani-kova 2018.

Kadmium är en tungmetall, med atomnummer 48. Den totala globala produktionen av raffinerad kadmium uppgick till 23 000 ton år 2017, en minskning med 900 000 ton, där Kina står för den största produktionen på 8 200 ton följt av Sydkorea med 3 600 ton år 2017. Kadmium återfinns huvudsakligen i zinkmalm och är därför framträdande i mineralen zinkbländ, men även i de ovanligare mineralerna greenrockit och wurtzit (U.S. Geological Survey 2017). Kadmium är giftigt och tas lätt upp i växtrötter. Det bioackumuleras, d.v.s. anrikas i organismer, och kan således ofta föras upp i näringspyramiden tills människor får i sig dem (Naturvårdsverket 2018).

Natrium med atomnummer 11 är, likt litium, en av de alkaliska metallerna,. Natrium utvinns främst ur salt (natriumklorid), för vilket de globala tillgångarna är mycket stora. 2017 producerades 280 miljoner ton salt, dock är det oklart hur mycket av detta som användes för att utvinna natrium, då salt har många andra användningsområden. Den största producenten av salt är Kina med 68 miljoner ton följt av USA med 43 miljoner ton och Indien med 26 miljoner ton (U.S. Geological Survey 2017).

Kobolt är en övergångsmetall med atomnummer 27. Kobolt utvinns främst ur sedimentära kopparfyndigheter i centrala Afrika eller från nickelbärgig latrit. Råvarutillgången är ca 7,1 miljoner ton och den årliga produktionen är ca 110 000 ton, var

den största tillverkaren är Demokratiska Republiken Kongo med 64 000 ton. Demokratiska Republiken Kongo är också det land med de enskilt största reserverna med 3,5 miljoner ton följt av Australien med 1,2 miljoner ton och Kuba med 500 000 ton. Omkring 120 miljoner ton kobolt har identifierats på havsbotten i manganfyndigheter (U.S. Geological Survey 2017).

Bly är en tungmetall, med atomnummer 82, och är en av de vanligast förekommande metallerna i batterier, främst bilbatterier. Den totala gruvproduktionen uppgick 2017 till 4,7 miljoner ton, där de största producenterna är Kina med 2,4 miljoner ton följt av Australien med 450 000 ton. Totalt uppgår reserverna till 88 miljoner ton där Australien innehar de största reserverna på 35 miljoner ton följt av Kina med 17 miljoner ton. Globala blyfyndigheter uppgår till 2 miljarder ton, då det på senare år har upptäckts betydande fyndigheter i zink-, silver- och kopparfyndigheter i Australien, Kina, Irland, Mexiko, Peru, Portugal, Ryssland och USA (U.S. Geological Survey 2017).

I naturen binder bly till organiska material i marken vilket kan leda till för höga halter av ämnet som kan skada mikroorganismer och smådjur. Bly är giftigt redan vid låga halter. Hos människor och andra organismer kan ämnet ge stora skador på njurarna och nervsystemet (Naturvårdsverket 2017 & 2018).

Kvicksilver är en tungmetall, med atomnummer 80. Det används mindre och mindre i batterier, men hittas till viss del i knappcells batterier (Batteriåtervinningen, 2018). År 2017 uppgick gruvproduktionen till 2 500 ton. Det är oklart hur stora reserverna av kvicksilver är men Kina, Kyrgyzstan och Peru tros ha de största reserverna. Världens kvicksilverfyndigheter uppskattas vara 600 000 ton och finns huvudsakligen i Kina, Kyrgyzstan, Mexiko, Peru, Ryssland, Slovenien, Spanien och Ukraina (U.S. Geological Survey 2018).

Kvicksilver är ett av de farligaste miljögifter som finns; det kan orsaka skador på hjärnan och det centrala nervsystemet och hämma utvecklingen hos foster. Det kan spridas i luften vid avfallsförbränning, och kan i naturen omvandlas till metylkvicksilver som anrikas i organismer (Naturvårdsverket 2018). I Sverige exponeras människor pga. anrikningen i organismer främst vid intag av fisk.

9.4.1.3 Internationella överenskommelser och regleringar för metaller

Av metallerna är kvicksilver, kadmium och bly speciellt skadliga. Dessa metaller ingår därför i många internationella konventioner och direktiv för att minska deras spridning i naturen:

- FN:s luftvårdskonvention (CLRTAP)
- EU:s luftkvalitetsdirektiv (2008/50/EG)
- EU:s vattendirektiv (2000/60/EG)
- EU:s grundvattendirektiv (2006/118/EG)
- EU:s dricksvattendirektiv (98/83/EG)
- EU:s slamdirektiv (86/278/EEG)

- EU:s förordning om gränsvärden för livsmedel.

Kvicksilver har ytterligare en konvention på FN-nivå: Minamatakonventionen.

9.4.1.4 SMES

SMES eller Superconducting Magnetic Energy Storage är en metod där elektrisk energi lagras i ett magnetfält. Detta möjliggörs av att de supraledande koppartrådarna kan leda ström utan några förluster. Denna ström skapar ett magnetfält som lagrar energin som sedan kan utnyttjas genom att tillföra en last till systemet. Detta kan ske på enstaka millisekunder och är därför ett utmärkt verktyg för att försäkra energikvaliteten i ett elnät. För att koppartrådarna ska vara supraledande krävs det att de är tillräckligt nedkylda, industriella applikationer använder sig av flytande helium som har en temperatur på 4 K (-269,15 °C). En SMES kan lagra upp till 5000 MWh och leverera denna energi med väldigt låga förluster, verkningsgraden är ca 95 %. SMES har många fördelar såsom dess långa livslängd (20 år), höga grad av mobilitet och dess kompakta storlek. Den kan också vara ett bra verktyg för att förstärka vindkraftsgeneration av el då den kan hantera både reaktiv och aktiv effekt kan den användas för att släta ut fluktuationerna i spänning och effekt som associeras med vindkraft (Boyes 1999, Ali *et al.* 2010).

9.4.1.5 Vätgas och bränsleceller

Vätgas kan användas för att transportera, lagra och tillhandahålla energi och kan tillverkas av alla sorters energikällor. Vätgas är den vanligaste gasen i universum och bidrar till 92 % av all materia. Det är även det enklaste och lättaste grundämnet, bestående av endast en elektron och en proton, vilket är anledningen till att väte i gasform är mycket ovanligt på jorden. Den är tillräckligt flyktig för att undkomma jordens gravitation. Dock finns det stora mängder bundet i vatten, vilket kan spjälkas, d.v.s. att med hjälp av elektrolys bryta bandet mellan väteatomerna och syreatomerna. Processen att spjälka vatten är en endoterm reaktion, d.v.s. en reaktion som kräver energi. Vätgas är ett extremt energitätt bränsle med en energitäthet på 770 Wh/l jämfört med bly-syrabatteri 70 Wh/l och litium-jonbatteri 170 Wh/l. Den största utmaningen med vätgas beror på dess ringa storlek som medför att gasen är extremt flyktig och därigenom svår att inkapsla. Det finns olika föreslagna metoder för lagring av vätgas, där den mest konventionella är som gas eller vätska i tankar (von Helmolt 2007). När vätgasen sen ska användas och bli el använder man bränsleceller som fungerar i som galvaniska celler/batterier då de omvandlar den kemiska energin som frigörs i den elektrokemiska reaktionen mellan väte och syre till elektrisk energi. Cellen består av en anod och en katod som har ett membran mellan sig vilket bara släpper igenom positivt laddade partiklar. Den totala spänningen som fås över en bränslecell ligger på ca 1,23 V och för att få ut en spänning hög nog att driva en elmotor, seriekopplas bränslecellerna för att uppnå den önskade spänningen. Verkningsgraden hos bränsleceller varierar, den teoretiska maxgränsen ligger på 80-90 % i system som kombinerar el- och värmeutvinning ur cellen. Enligt World Energy Council (2014) har en vätgasbränslecell, som opererar vid rumstemperatur 25°C, en teoretisk verkningsgrad på 83 %. Detta är

dock bara uppnåeligt om cellen matas med rent syre och väte, och kan nyttja all elektrisk och termisk energi. I praktiken bör man dock bara räkna med en verkningsgrad på dryga 30-50%.

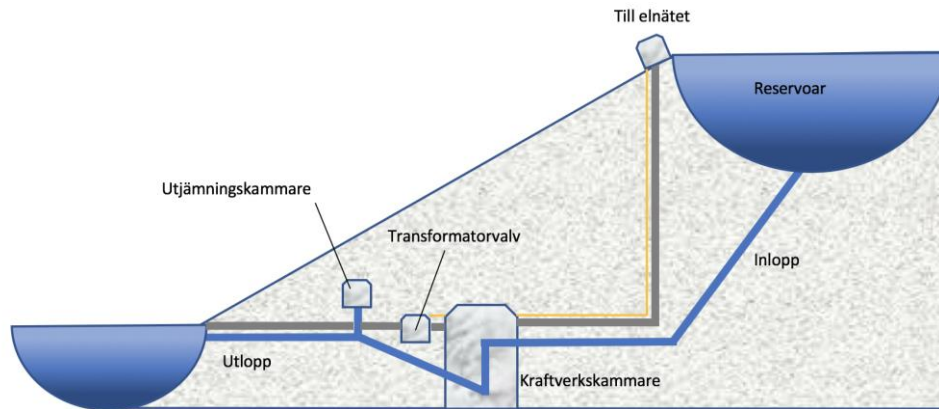
9.4.1.6 Miljöpåverkan från vätgas

Det är bara den s.k. gröna vätgasen som är fossilfri och är intressant då den lagrar energi från intermittenta förnybara energikällor som sol- och vind. Övrig vätgas produceras med fossila bränslen och leder till stora utsläpp av koldioxid, den kallas grå vätgas om den bildats genom ångreforming av fossilgas och blå vätgas om man har lagt till ett koldioxidinfångningssteg i processen. (Naturskyddsföreningen 2021)

9.4.2 Icke-elektriska ackumulatorer

9.4.2.1 Pumpkraftverk

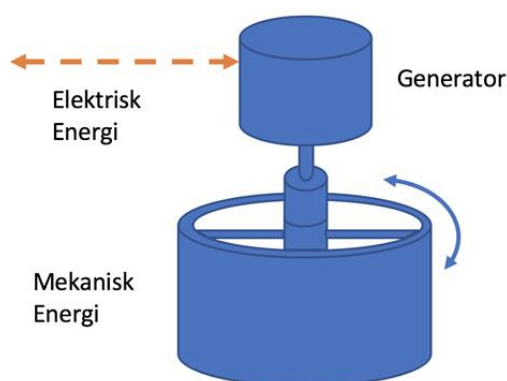
Ett pumpkraftverk är en hyfsat enkel teknik som bygger på att man utnyttjar potentiell energi genom att pumpa upp vatten från en reservoar på låg höjd till en reservoar på högre höjd då elbehovet är litet. Kraftverket drivs då överskottsel finns tillgängligt och pumpar då upp vatten genom rör. När man behöver utnyttja vattnets potentiella energi, exempelvis då elbehovet är stort, kan man frigöra vattnet från den högre reservoaren, vilken leder vattnet in i ett rör och ner till en turbin ansluten till en generator. Pumpvattenteknik är en etablerad teknik som fungerar väl i stor skala. Europa och Sverige har ett begränsat antal platser kvar som är lämpliga för att anlägga ett pumpkraftverk eftersom man måste ta hänsyn till den lokala miljön och landskapet. I Figur 36, ses en principskiss på hur ett pumpkraftverk kan se ut. I Sverige finns tre pumpvattenkraftverk: Eggsjön, Kymmen och Letten, alla ligger i norra Värmland. Kymmen är byggd 1987 och producerar 34 GWh/år. Letten är byggd så tidigt som 1856 och producerar 65 GWh/år. I bland annat Kina och Indien finns stor potential att anlägga effektiva anläggningar då de har vissa geografiska fördelar. Andra länder får överväga att anlägga pumpvattenkraft med saltvatten samt användande av underjordiska vattenmagasin i berggrum. År 2011 fanns det 280 anläggningar runt om i världen på en total effekt om 132 GW. En fördel med pumpvattenkraft är att responstiden är kort vilket innebär att de med enkelhet kan svara för spänning och frekvensstyrning samt roterande och ickeroterande reservkrafter. (Nordling *et al.* 2015)



Figur 36. Principskiss på ett pumpkraftverk, där vatten pumpas till den högre reservoaren när tillgången på el är högre än efterfrågan. När efterfrågan blir högre låter man vatten passera genom kraftverkskammaren för att generera el.

9.4.2.2 Svänghjul

Ett svänghjul lagrar energi i form av kinetisk energi. Med hjälp av magnetiska kullager låter man en rotor med hög massa spinna snabbt och genom att bromsa motorn kan man få ut energi, genom att tillföra energi till motorn spinner rotorn snabbare och lagrar på det viset energi. För en principskiss, se Figur 37. Rotorn är innesluten av ett skyddande stålhölje som innesluter rotor, motor, generator och andra roterande delar av effektivitets- och säkerhetsskal. Effektiviteten påverkas positivt av inneslutningen då det påverkar verkningsgraden. Rotorn körs oftast i vakuum, alternativt i gaser med låg friktion till exempel helium. Ett svänghjul kräver lite plats för att lagra en relativt hög effekt vilket innebär att den har en hög energidensitet. Den har även en kort responstid och lång livslängd, upp till 20 år, kan dimensioneras mellan 100 - 1650 kW och har en effektivitet på ca 93 %. (Nordling *et al.* 2015)

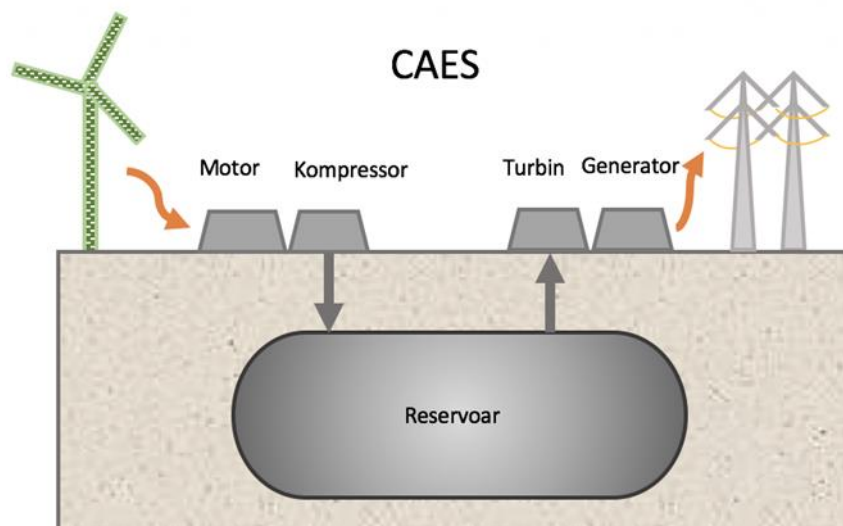


Figur 37. Enkel principskiss på hur ett svänghjul fungerar. När produktionen av elenergi är högre än efterfrågan, låter man elektrisk energi omvandla energin till mekanisk energi (kinetisk energi) genom att låta rotorn spinna i hög hastighet i vakuum.

9.4.2.3 Komprimerad tryckluft

CAES, compressed air energy storage, använder el när tillgång på den är större än efterfrågan och komprimerar luft i en reservoar. En typ av reservoar kan vara rörledningar, akvifärer, underjordiska grottor, nedlagda gruvor eller liknande utrymmen. Då tillgången på el är mindre än efterfrågan, värms den komprimerade luften upp och expanderar på så sätt och leds genom en turbin för att producera ny el. Figur 38 visar en principskiss på hur CAES fungerar. Dessvärre har komprimerad tryckluft en relativt låg verkningsgrad då stora mängder värme avgår vid kompressionen. Verkningsgraden ligger därför mellan 42-50 %. CAES är en teknik som liknar vid pumpkraftanläggningar då det är den enda storskaliga lagringstekniken som utvecklats (Nordling *et al.* 2015). Den första anläggningen stod klar i Tyskland redan 1978, vilken hade en effekt på 290 MW och en verkningsgrad på 42 %. Den placerades i en så kallad saltkupol, vilken är optimal för den typen av energilagring. Det är en underjordisk ficka som bildas av förångningsmineraler som tränger in i ett bergsskikt. Östra Washington och Oregon är exempel på lämpliga platser för CAES, där tekniken håller på att implementeras. För att avgöra om platsen är lämplig kan man till exempel göra en bedömning, skanning, av marken för att bestämma avstånd till eventuella gasledningar och andra geologiska riskområden. Det genomförs ett projekt i Österrike som enligt plan ska stå klart 2020, vilken använder sig av krossad sten för att lagra värme som gått förlorad under kompressionsprocessen för att förbättra effektiviteten. Detta klassas som en så kallad adiabatisk process. (McGrail *et al.* 2013)

Adiabatiska anläggningar är förhoppningen för att höja effektiviteten på CAES. Värmen som genereras vid kompression används istället för att öka energieffektiviteten. Energidensiteten i ett sådant verk är 0,5-0,8 kWh/m³ vid 60 bar. (Nordling *et al.* 2015)



Figur 38. Principskiss på energilagringstekniken komprimerad tryckluft. Detta är en modell som komprimerar luft i en reservoar under jordytan. Observera att andra tekniker också kan användas, till exempel kan en reservoar bestå av ett rör eller en gammal gruva.

9.5 Elvägar - alternativ till energilagring

Det finns vissa fall där lagring av energi ställs emot andra lösningar, och eftersom energilagring i regel innebär större förluster än direkt användning kan dessa alternativ ofta vara fördelaktiga. Ett exempel på sådan teknik är elvägar.

Elektrifiering av vägnätet är ett koncept som kan innebära minskat behov av energilagring. Att utrusta vägar med teknik som kan förse fordon med elektrisk energi medan de åker kan innebära att mindre energi behöver lagras i fordonens batterier, och kan förlänga deras räckvidd om batterierna är en begränsande faktor.

Tre former av elvägar är aktuella i dagsläget när fordon ska förses med energi:

1. via elledningar som hänger ovanför vägen,
2. via skenor i vägbanan eller
3. med hjälp av induktiva element i eller intill vägbanan

Dessa lösningar har olika för- och nackdelar med avseende på konstruktions- och driftkostnad, risker och energieffektivitet etc. men har gemensamt att de alla innebär mindre energiförluster än energilagring (WSP 2013). De nämnda konduktiva lösningarna, d.v.s. där fysisk kontakt behövs mellan fordon och elledare, är så gott som förlustfria. Energieffektiviteten hos induktiva lösningar uppskattas vara 85-90 %, men över 95 % effektivitet har uppnåtts i tester (Olsson 2013). Nämnvärt är även att eftersom elvägar baseras på befintlig infrastruktur är konstruktionskostnaden för dem betydligt lägre än för exempelvis järnväg: olika elvägslösningar har uppskattats kosta mellan fem och femton miljoner kronor per kilometer (Elways 2010), medan exempelvis Botniabanan kostade över 140 miljoner kronor per kilometer att bygga (Riksrevisionen 2011).

9.6 Avfall och återvinning

9.6.1 Solceller

Med den ständigt växande marknaden för solceller ökar även takten med vilken tekniken utvecklas. Forskningen kring solceller fokuseras dock i regel på förbättrad kapacitet snarare än återvinningsbarhet. Eftersom solceller i regel har lång livslängd har deras återvinning under många år varit en ickefråga, men fler solceller börjar nu i större utsträckning nå slutet av sin användbarhet och hanteringen av dessa blir ett problem (Aman *et al.* 2015). Ofta innehåller solceller bly, tenn och kadmium vilka utgör ett hot för miljön om de inte tas om hand (Bakhiyi *et al.* 2014).

På grund av de växande mängderna avfall och de potentiella miljöriskerna inkluderades solpaneler 2012 i EU:s direktiv för elektriskt och elektroniskt avfall (EU 2012), och en juridisk grund lades för reglering av deras insamling, transport och

återvinning. Kraven som ställs på tillverkare varierar men är sedan 2014 i kraft i alla EU-länder (PV CYCLE 2018).

Återvinningen av solceller behöver dock inte bara vara en börda utan har visat sig ha ekonomisk potential. Mycket av det solcellerna är gjorda av kan antingen användas för att bygga nya solceller eller återanvändas på andra håll. Aluminiumramar kan återanvändas och glas, som utgör majoriteten av solcellers massa, kan antingen användas till exempelvis isolering eller bearbetas och användas i nya solceller (GreenMatch 2017). Vidare innehåller de flesta solceller kristallint kisel som har en enormt energikrävande tillverkningsprocess. Att återanvända kisel i förbrukade solceller har uppskattats vara tre gånger så energieffektivt som att producera nytt (Choi & Fthenakis 2010). Den plast som ingår i solcellerna är svårare att återanvända men kan tas tillvara på genom att användas som energikälla i återvinningsprocessen (GreenMatch 2017).

Återvinningsprocesserna skiljer sig naturligtvis åt för olika sorters solceller, men i regel är det just nu möjligt att återvinna över 90 % av kiselsolcellers och 97 % av tunnskiktssolcellers vikt (PV CYCLE 2016). Det gör att återvinning av solceller har enorm potential att minska svinnet av resurser, och minska trycket på utvinningen av råmaterial som den ständigt ökande efterfrågan innebär. International Renewable Energy Agency, IRENA, uppskattar att avfallet från solceller kan vara 78 miljoner ton år 2050, vilket motsvarar ett värde av upp till 15 miljarder dollar om det återanvänds (Weckend *et al.* 2016). Mängden avfall skulle kunna räcka till att producera två miljarder nya solpaneler (Weckend *et al.* 2016). Denna ekonomiska potential har inte gått obemärkt förbi. I juni 2018 öppnades i Frankrike den första återvinningsanläggningen för solceller i Europa, och troligen världen. Anläggningen ska enligt kontrakt återvinna så gott som allt solcellsavfall som produceras i Frankrike, och liknande anläggningar planeras i andra länder (De Clercq 2018).

9.6.2 Batterier

Som tidigare nämnt förekommer batterier i mängder av former, många av vilka innehåller miljöfarliga ämnen. Omhändertagandet av batterier efter att de förbrukats är därför av stor vikt. Batterier är dock ingen ny teknik, och insamlingen av dem är numera väl etablerad i många länder. Enligt samma direktiv som för solceller har producenter av batterier i samtliga EU-länder sedan flera år ansvar för att det finns ett fungerande system för insamling och återvinning av dem (EU 2012). De exakta kraven kan skilja sig från land till land. Naturvårdsverket (2018) listar Sveriges mål för batterier som att:

- 95 % av antalet sålda bil- och industribatterier (gäller både de med och utan bly) ska samlas in.
- 75 % av antalet sålda övriga batterier ska samlas in.

Utöver dessa finns det mål för särskilt omhändertagande, att minst:

- 98 % av allt kvicksilver i batterier ska omhändertas.
- 65 % av blybatteriers genomsnittsvikt ska återvinnas (med så hög återvinningsgrad som möjligt med avseende på bly).
- 75 % av nickelkadmiumbatteriers genomsnittsvikt ska återvinnas (med så hög återvinningsgrad som möjligt med avseende på kadmium).
- 50 % av övriga batteriers genomsnittsvikt återvinns.

Anledningen till att batterier som innehåller kvicksilver, kadmium och bly nämns speciellt i målen är att dessa ämnen är mycket giftiga och således utgör en stor fara om de släpps ut i naturen. Kvicksilver och kadmium blir mer och mer ovanliga i batterier, kvicksilver ska fasa ut och kadmium miljöbeskattas, men finns fortfarande i cirkulation. Bly används fortfarande ofta i bl.a. bilbatterier, men deras uppsamling är välfungerande och upp till 98 % av deras innehåll kan återanvändas (Batteriåtervinningen 2018).

9.7 Gruvdriftens miljöpåverkan - LCA

För att ta reda på miljöpåverkan av metaller kan man använda sig av livscykelanalys (LCA) för olika typer av miljöpåverkan. Med fokus på klimatpåverkan, markanvändning och försurning visar Tabell 14 utsläppsvärden för några av de metaller som ofta används i batterier och solceller. Sammanställningen i tabellen ger en överskådlig bild över miljöpåverkan från metallers brytning, dock har inte brukandet av metallerna, i t.ex. solceller, och dess positiva klimatpåverkan, tagits med i kalkylen. Den visar att utsläppen från gruvdriften varierar mycket mellan metaller. Till viss del kan detta dock påverkas av metodvalet för livscykelanalysen. Exempelvis har gallium, som endast är en biprodukt vid utvinning av andra metaller (Sveriges Geologiska Undersökning, 2016a), mycket höga värden. Informationen har inhämtats från databasen EcoInvent (2018), en databas för livscykelanalysvärden. Kategorin "market for X" har använts. Systemmodellen som använts är CLCA (consequential life cycle assessment), denna metod använder systemexpansion för att beräkna miljöpåverkan (GWP = global warming potential), markåtgång (ALOP = agricultural land occupation potential, enheten m^2a är area time, hur snabbt en viss typ av land ändras till en annan) och försurning (TAP = terrestrial acidification potential).

Tabell 14. Miljöpåverkan från utvinning av olika metaller. Siffran 100 i kolumnerna är för att värdena avser bedömning av påverkan i ett 100 års perspektiv. Källa: Ecoinvent 2018.

1 kg metall	GWP100 (kgCO ₂ eq)	ALOP (m ² a)	TAP100 (kgSO ₂ eq)
Batterimetaller			
Nickel	11,3	3,9	1,380
Litium	49,4	24,2	0,314
Natrium	0,8	0,1	0,003
Kadmium	1,5	2,6	0,023
Bly	0,1	0,9	0,020
Solcellsmetaller			
Indium	6,2	0,7	0,020
Gallium	170,0	26,1	0,514
Zink	5,8	1,1	0,050
Aluminium	11,1	0,2	0,064

9.8 Koppling till svenska och globala mål

9.8.1 Svenska miljömålen

Några av de svenska miljömål som detta kapitel berör är **giftfri miljö**, **begränsad klimatpåverkan** och **god bebyggd miljö**. Ingen av dessa mål räknar man med att uppnå till 2020 (Naturvårdsverket 2018), vilket är ett stort problem. För att nå mål bör Sverige arbeta aktivt med många delar som tas upp i denna rapport, som resurser, nyttjande och avfallshantering och utveckling av olika energisystem.

Både batterier och solceller är teknik som ständigt växer i omsättning, och hur effektivt vi än återvinner innebär det att dessa industrier ständigt är i behov av nya råvaror. Flera metaller utvinns huvudsakligen för batteritillverkning (Ekberg & Petranikova 2018). Gruvindustrin som den ser ut idag har mängder av negativa effekter både lokalt och globalt (Carvalho 2017). Gruvdrift i Sverige är hårt reglerat, men gruvindustrin genererar ändå flera gånger mer avfall än alla andra företag och alla hushåll tillsammans (110 000 000 ton år 2016). I många delar av världen finns inte samma sorts förordningar som i Sverige, varför gruvdriften där på sikt kan komma att ha enorma konsekvenser för miljön. För att uppnå hållbarhet är det nödvändigt att gruvindustrin ses över och det är mycket troligt att det som krävs är att gruvdrift regleras i större utsträckning, enligt Carvalho (2017).

Trots att vi redan har möjlighet att utvinna stora mängder energi har vi fortsatt inte löst den stora, komplexa frågan angående lagring av energi och det har visat sig vara en av de större utmaningarna vi står inför. Idag finns flera olika alternativ för energilagring men som bekant är det ingen av dessa lösningar som ensamt kan lösa problemet och dessutom har de alla sin egen påverkan på miljö och klimat. Ett pumpkraftverk kan lagra stora mängder energi men har en betydande inverkan på det lokala ekosystemet. Detsamma gäller för komprimerad tryckluft som är väldigt

beroende av den lokala miljön. Svänghjul är också en lösning med stor potential men som bland annat innebär en viss säkerhetsrisk då den kan splittras om man överbelastar den. Vätgas och SMES är två lösningar med väldigt stor potential då de i teorin skulle kunna vara ideala lösningar för de problem vi står inför. Dock är det mycket avancerad teknik som behöver stora investeringar och forskning för att kunna utvecklas och implementeras i samhället.

För att kunna uppnå alla dessa mål krävs det internationellt utvecklingssamarbete och hållbart företagande. Det räcker inte att Sverige har mål och regleringar då Sverige bara är ett av många länder som kräver hållbar utveckling för att uppnå en social, ekonomisk och miljömässig hållbarhet i framtiden.

9.8.2 FN:s globala mål

Några av de miljömål av de 17 globala miljömål som Sverige har ingått i (Regeringen 2015) som detta kapitel berör är **mål 7: hållbar energi, mål 9: hållbar industri, innovation och infrastruktur, mål 11 och 12 som innebär hållbara städer, samhällen, konsumtion och produktion** och givetvis **mål 13: som innebär att bekämpa klimatförändringen**.

En förutsättning för att vi gemensamt på planeten ska kunna möta de utmaningar världen står inför är att vi alla har tillgång till modern och förnybar energi. En stor andel av de ökande utsläppen som vi idag genererar står vår ohållbara energiförsörjning för. Andelen fossil energi utgör nästan 80 % av den totala energiförsörjningen globalt (Regeringen 2015). **Mål 7, Hållbar energi för alla**, innebär att man ska underlätta tillgång till forskning och teknik inom ren energi, förnybar energi, energieffektivitet samt avancerad och renare fossilbränslebaserad teknik och främja investeringar i energiinfrastruktur.

Tekniken bakom solceller, värmeceller, solkraftverk, geotermisk energi, lagring av energi, pumpkraftverk, svänghjul, bränsleceller är mycket avancerad. Det är alla dessa gemensamma lösningar på dagens energiförsörjningsproblem som tillsammans kan skapa en lösning för att skapa en hållbar konsumtion och produktion av elenergi eller bränsletillförsel. Detta krävs inte bara för att alla på planeten ska få tillgång till el och energi, utan även för att se till att bevara våra ekosystem och biologisk mångfald, bekämpa klimatförändringarna och skapa hållbara städer och samhällen för alla.

Gruvdriften för att ta fram metaller till olika energilagringslösningar har en betydande påverkan på bland annat växthuseffekten, försurning och markanvändning (Ecoinvent 2018). Vi ser även att batterier innehåller ämnen som är mycket giftiga och skadliga för både natur och hälsa om de släpps ut. Solceller kan efter sin livstid återanvändas och behöver inte vara ännu en belastning som avfall. Om man inte tar tillvara på avfallet som innehåller farliga ämnen som bly, tenn och kadmium (Bakhiyi *et al.* 2014) har solceller stora potentiella miljörisker (EU 2012). Om dessa skadliga ämnen däremot hanteras på rätt sätt och återanvänds eller återvinns är vi på god väg till smarta och hållbara energilagringmetoder.

9.9 Instuderingsfrågor

- Beskriv miljöpåverkan av solceller.
- Beskriv främsta miljöpåverkan av solkraft.
- Tunnfilmssolcellerna CIGS och Cdte innehåller båda en tungmetall, vilken? Tungmetallen återfinns i flera mineraler. Vilken miljöpåverkan orsakar metallen?
- Nämn två olika typer av miljöpåverkan som geotermisk energi genererar.
- Nämn tre metaller som utgör en stor del av batteriindustrin.
- Förklara den grundläggande tekniken för ett pumpkraftverk.
- Vilka metaller nämns speciellt i direktiven för batteriåtervinning? Varför?
- Vilka typer av miljöpåverkan kan en LCA för gruvmetaller visa på?
- Hur kan man i nuläget lagra energi i stor skala från intermittenta energikällor?

Referenslista

Referenser till kapitel 1

- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC. ISBN 1-59726-040-1
- Morrison, G. (2009) Mälarens värde 40 000 000 000,00 – en förstudie av det potentiella värdet av Mälarens ekosystemtjänster och sociotekniska systemtjänster, samt dess värde för människans välbefinnande, VAS-rådets rapporter nr 8, ISSN 1653-8870
- Naturvårdsverket (2001) *Monitor 17: Will time heal every wound?* 180 sidor. ISBN: 91-620-1214-2.
- Naturvårdsverket (2015) *Mål i sikte – Analys och bedömning av de 16 miljökvalitetsmålen i fördjupad utvärdering vol 1*, Rapport 6662, ISBN 978-91-620-6683-3.
- Naturvårdsverket (2018) *Varg, inavel i Skandinavien. Så mår miljön, fakta & statistik*: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Varg-inavel/>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J.A. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475, <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B. & Sörlin, S. (2015) Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science* 13 Feb 2015. Vol. 347, Issue 6223, 1259855, <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

Referenser till kapitel 2

- Abasa, N., Kalair, A. & Khan, N. (2015) Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures* 69: 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.03.003>
- ACS (2016) *It's Water Vapor, Not the CO₂*. American Chemical Society. <https://www.acs.org/content/acs/en/climatescience/climatesciencenarratives/its-water-vapor-not-the-co2.html>
- ACS (2018) *ACS Climate Science Toolkit | Greenhouse*. American Chemical Society. <https://www.acs.org/content/acs/en/climatescience/greenhouse-gases/sourcesandsinks.html>
- Baird, C. & Cann, M. (2012) *Environmental Chemistry*. 5 upplagan.
- Bernes, C. (2016) *En varmare värld: Växthuseffekten och klimatets förändringar*. 3 upplagan. Naturvårdsverket. <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-1300-4.pdf?pid=19441>
- Borealis (2017) *Borealis sätter Hälsa, Miljö och Säkerhet överst på dagordningen*. <https://www.borealisgroup.com/stenungsund/borealis-i-sverige/milj%C3%B6-ansvar>
- Carbon Capture and Storage Association (2018) *What is CCS?* Carbon Capture and Storage Association. <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/>
- Cementa (2018) *Nollvision för koldioxid*. <https://www.cementa.se/sv/nollvision2030>

- Chan, F., Boehm, A.B., Barth, J.A., Chornesky, E.A., Dickson, A.G., Feely, R.A., Hales, B., Hill, T.M., Hofmann, G., Ianson, D., Klinger, T., Largier, J., Newton, J., Pedersen, T.F., Somero, G.N., Sutula, M., Wakefield, W.W., Waldbusser, G.G., Weisberg, S.B. & Whiteman, E.A. (2016) The West Coast Ocean Acidification and Hypoxia Science Panel: Major Findings, Recommendations, and Actions. California Ocean Science Trust. <http://westcoastoah.org/wp-content/uploads/2016/04/OAH-Panel-Key-Findings-Recommendations-and-Actions-4.4.16-FINAL.pdf>
- Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A. & Kleypas, J.A. (2009) Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2009. 1:169–92. Doi: 10.1146/annurev.marine.010908.163834
- Ekonomifakta (2018a) Energianvändning. <https://www.ekonomifakta.se/Fakta/Energi/Energibalans-i-Sverige/Energianvandning/>
- Ekonomifakta (2018b) Användning av fossila bränslen per sektor. <https://www.ekonomifakta.se/Fakta/Energi/Energibalans-i-Sverige/Anvandning-av-fossila-branslen/>
- Enerdata (2018a) Global Energy Statistical Yearbook - Total Energy Consumption. <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>
- Enerdata (2018b) Global Energy Statistical Yearbook - Total Energy Production. <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-production.html>
- Energimyndigheten (2009) Fossila energikällor. <http://www.energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Vad-ar-energi/Energibarare/Fossil-energi/>
- EPA (2016) Overview of Greenhouse Gases. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- Global CCS Institute (2016) The Global Status of CCS. Introducing Industrial Carbon Capture and Storage, Melbourne, Australia.
- Globala Målen (2018) Mål 13: Bekämpa Klimatförändringarna. www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-13-bekampa-klimatforandringarna/
- Houghton, J. (1997). *Global Warming. 2:a upplagan.* Cambridge.
- Hull, C. (2009) GHG Lifetimes and GWPs. Rapport/Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Manitoba: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://climatechangeconnection.org/wp-content/uploads/2014/08/GWP_AR4.pdf
- ICOS (uå) Nitrous Oxide. ICOS. <https://www.icos-ri.eu/greenhouse-gases/nitrous-oxide>
- IPCC (2001) The Scientific Basis. IPCC. <https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/016.htm>
- IPCC (2014) Globally averaged greenhouse gas concentrations. Tabell 1.3 http://ar5-syr.ipcc.ch/topic_observedchanges.php
- Jernkontoret (2018) HYBRIT - fossilfri stålproduktion. <https://www.jernkontoret.se/sv/vision-2050/koldioxidfri-stalproduktion/>
- Khan Academy (2015) Steps of cellular respiration. Khan Academy. <https://www.khanacademy.org/science/biology/cellular-respiration-and-fermentation/overview-of-cellular-respiration-steps/a/steps-of-cellular-respiration>
- LKAB (2018) Hållbarhetsmål. <https://www.lkab.com/sv/hallbarhet/vart-hallbarhetsarbete/hallbarhetsmal/>
- Lulekraft (2012) Vi ingår i stålets kretslopp. <http://lulekraft.se/miljoen.aspx>
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., T. Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. & Zhang, H. (2014) Global Warming Potential Values. Rapport/Greenhouse Gas Protocol. Cambridge: Cambridge University Press.

- https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf
- NASA (2018) Water Vapor. NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MYDAL2_M_SKY_WV
- Nationalencyklopedin (2018a) Fossila bränslen. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/fossila-br%C3%A4nslen>
- Nationalencyklopedin (2018b) Kol. [https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/kol-\(bergarten-kol\)](https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/kol-(bergarten-kol))
- Nationalencyklopedin (2018c) Naturgas. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/naturgas>
- Naturvårdsverket (2018) Fossila bränslen. <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Energi/Fossila-branslen/>
- NCEI (2016a) How Can Tree Rings Teach Us About Climate? <https://www.ncei.noaa.gov/news/how-can-tree-rings-teach-us-about-climate>
- NCEI (2016b) How Can Corals Teach Us About Climate? <https://www.ncei.noaa.gov/news/how-can-corals-teach-us-about-climate>
- NCEI (2016c) How Can Ice Teach Us About Climate? <https://www.ncei.noaa.gov/news/how-can-ice-teach-us-about-climate>
- NCEI (2016d) How Can Pollen Teach Us About Climate? <https://www.ncei.noaa.gov/news/how-can-pollen-teach-us-about-climate>
- NOAA climate.gov (uå) Climate Models. <https://www.climate.gov/maps-data/primer/climate-models>
- Petersson, G. (2006) Kemisk Miljövetenskap. 6 upplagan. Institutionen för Kemi- och bioteknik, Chalmers. <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/72643.pdf>
- Platt, J. (2012) 6 surprising sources of methane. Mother Nature Network. <https://www.mnn.com/earth-matters/climate-weather/stories/6-surprising-sources-of-methane>
- Preem (2017) Miljö och klimat. https://www.preem.se/om-preem/finansuell_info/hallbarhetsredovisning-2017/fokusomraden/miljo-och-klimat/
- Regeringskansliet (2018) Mål för energipolitiken. <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/energi/mal-och-visioner-for-energi/>
- Romare, P. (2013) Foraminiferer. Fokus Forskning. <https://www.fokusforskning.lu.se/2014/09/10/foraminiferer/>
- Sjökvist, E., Axén Mårtensson, J., Dahné, J., Köplin, N., Björck, E., Nylén, L., Berglöv, G., Tengdelius Brunell, J., Nordborg, D., Hallberg, K., Södling, J. & Berggreen Clausen, S. (2015) Klimatscenarier för Sverige. *Klimatologi* (15). SMHI. https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.165049!/Klimatologi_15%20Klimatscenarier%20f%C3%B6r%20Sverige%20-%20Bearbetning%20av%20RCP-scenarier%20f%C3%B6r%20meteorologiska%20och%20hydrologiska%20effektstudier.pdf
- SSAB (2018) Uppgradera och spara in på CO2-utsläpp - SSABs koncept EcoUpgraded. <https://www.ssab.se/ssab/hallbarhet/hallbart-erbjudande/ecoupgraded>
- St1 (2018) Kan ett energibolag vara miljökämpar? <https://www.st1.se/om-st1/var-vision>
- Stockholmexergi (2018) Värtaverket. <https://www.stockholmexergi.se/om-stockholm-exergi/vara-anlaggningar/vartaverket/>
- Stockholmexergi (2019) Teknik för att fånga in koldioxid testas i Stockholm. <https://www.stockholmexergi.se/nyheter/teknik-for-att-fanga-in-koldioxid-testas-i-stockholm/> Nyhet 2 maj 2019

- Sveriges Miljömål (2018a) Så fungerar arbetet med Sveriges miljömål. <http://sverigesmiljomal.se/sa-fungerar-arbetet-med-sveriges-miljomal/>
- Sveriges Miljömål (2018b) Begränsad miljöpåverkan. <http://sverigesmiljomal.se/miljomalen/begransad-klimatpaverkan/>
- Sveriges Miljömål (2018c) Frisk luft. <http://sverigesmiljomal.se/miljomalen/frisk-luft/>
- Sveriges Miljömål (2018d) Bara naturlig försurning. <http://sverigesmiljomal.se/miljomalen/bara-naturlig-forsurning/>
- Sveriges Natur (2017) De släppte ut mest koldioxid i Sverige 2017. <http://www.sverigesnatur.org/aktuellt/de-slappte-ut-mest-koldioxid-sverige-2017/>
- Sveriges Natur (2017b) Regeringen kan stoppa palmolja i biodiesel. <http://www.sverigesnatur.org/aktuellt/regeringen-kan-stoppa-palmolja-biodiesel/>
- Thomson, A.J., Giannopoulos, G., Pretty, J., Baggs, E.M. och Richardson, D.J. (2012) Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. NCBI. 5 maj. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3306631/>
- Turnbull, J. (2017) Carbon dioxide. Where does it come from? Where does it go? Deep South Challenge. <https://www.deepsouthchallenge.co.nz/news-updates/carbon-dioxide-where-does-it-come-where-does-it-go>
- UNDP (2018a) Globala målen. <http://www.globalamalen.se/om-globala-malen/>
- UNDP (2018b) Hållbar energi för alla. <http://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-7-sakerstalla-hallbar-energi/>
- UNDP (2018c) Bekämpa klimatförändringen. <http://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-13-bekampa-klimatforandringarna/>
- US-EPA (2022) Climate Change Indicators: Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases, United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases#:~:text=Carbon%20dioxide%20concentrations%20have%20increased,is%20due%20to%20human%20activities.>
- Vásquez-Elizondo, R. M. & Enríquez, S. (2015) Coralline algal physiology is more adversely affected by elevated temperature than reduced pH. *Sci. Rep.* 5, 19030; doi: 10.1038/srep19030
- Vattenfall (2013) Fakta om olja. <https://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varme-produktion/olja/>
- Vattenfall (2016) Fakta om kol. <https://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varme-produktion/kol/>
- Wayne, G.P. (2013) The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathway. *Skeptical Science*. <https://www.climate.gov/maps-data/primer/climate-models>
- Världsnaturfonden WWF (2017) Korallrev - havens regnskogar <http://www.wwf.se/wwfs-arbete/arter/1572749-korallrev>
- Zolitschka, B. (2007) Varved lake sediments. University of Bremen https://web.archive.org/web/20150922035619/http://www.climategeology.ethz.ch/education/limnogeology/Zolitschka_2007.pdf

Referenser till kapitel 3

- Akselsson, C. (2013) Försurning av mark och vatten i Sverige. BECC. https://www.cec.lu.se/sites/cec.lu.se/files/forsurning_01_2013_final.pdf
- Bertills, U. & Warfvinge, P. (2000) Naturens återhämtning från försurning – aktuell kunskap och framtidsscenarier. Naturvårdsverket. Rapport: 5028.

- Brandtberg, P.-O. & Simonsson, M. (2005) När markerna surna. Fakta Skog. Rapport:15. <https://www.slu.se/globalassets/ew/ew-centrala/forskn/popvet-dok/fakta-skog/faktaskog05/fs05-15.pdf>
- Cann, M. & Colin, B. (2008) Environmental Chemistry. 4. uppl. W. H. Freeman and Company.
- Department of primary industries and regional development (2018) Effects of soil acidity. Tillgänglig: <https://www.agric.wa.gov.au/soil-acidity/effects-soil-acidity>
- Emilsson, S. (2006) Från skogsbränsleuttag till askåterföring. Skogsstyrelsen. ISBN 91-975555-5
- Europaparlamentets och rådets direktiv 2008/50/EG av den 21 maj 2008 om luftkvalitet och renare luft i Europa (L 152/1, 11.06.2008, s.4, s.11)
- Fyrisåns vattenförbund (2007) Surhetstillstånd - pH-värde. <http://www.fyrisan.se/page.asp?categoryID=9&pageID=37>
- Goulding, K.W.T, Bailey, N.J., Bradbury, N.J., Hargreaves, P., Howe, M., Murphy, D.V., Poulton, P.R. & Willison, T.W. (1997) Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. Department of Soil Science, IACR- Rothamsted, Harpenden.
- Gustafsson, J.-P., Jacks, G., Simonsson, M. & Nilsson, I. (2008) Mark- och vattenkemi, teori. Kurskompendium. Institutionen för mark- och vattenteknik, KTH, Stockholm.
- Göta älvs vattenvårdsförbund (2016) pH-värde. <http://www.gotaalvvvf.org/resultat/begreppsforklaringar/phvarde.4.271d6b7512e53cf0cf980001003.html>
- Havs- och vattenmyndigheten (2014) Försurning av sjöar och vattendrag. <https://www.havochvatten.se/hav/fiske--fritid/miljopaverkan/forsurning-av-sjoar-och-vattendrag.html>
- Havs- och vatten myndigheten (2014) Kalkning och andra motåtgärder. <https://www.havochvatten.se/hav/fiske--fritid/miljopaverkan/forsurning-av-sjoar-och-vattendrag/kalkning-och-andra-motatgarder.html>
- Karlton, E., Saarsalmi, A., Ingerslev, M., Mandre, M., Andersson, S., Gaitnieks, T., Ozolinius, R. & Varnagiryte-Kabasinkiene, L. (2008) Wood ash recycling – Possibilities and risks. In: Röser *et al.* (eds). Sustainable use of Forest Biomass for Energy: A synthesis with focus on the Baltic and Nordic Region. (s. 79-108).
- Larsson, P. (2012) Sjöar kalkas i onödan. <https://www.kth.se/aktuellt/nyheter/sjoar-kalkas-i-onodan-1.343107>
- Laudon, H., Westling, O., Poléo, A., Asbjørn Vøllestad, L. (2001) Naturligt sura och försurade vatten i Norrland. Naturvårdsverket. Rapport: 5144. <http://www.swedshpa.se/Documents/publikationer/620-5144-X.pdf>
- Lindell, M. (2005) Humusämnen och försurning - en studie av den övre delen av Nisans avrinningsområde. Länsstyrelsen i Jönköpings Län. Rapport: 39. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:880410/FULLTEXT01.pdf>
- Länsstyrelsen Stockholms län (2005) Om försurning av sjöar och vattendrag. Stockholm: Länsstyrelsen Stockholms län. Rapport: 12.
- Mattson, M. (2018) Skogsbrukets påverkan på övergödning och försurning. Lunds Universitet. Naturvetenskapliga programmet. (Examensarbete).
- Miljömål (2016a) Ett rikt växt- och djurliv. <https://www.miljomal.se/Miljomalen/16-Ett-rikt-vaxt--och-djurliv/>
- Miljömål (2016b) Levande sjöar och vattendrag. <https://www.miljomal.se/miljomalen/8-levande-sjoar-och-vattendrag/>
- Miljömål (2016c) Levande skogar. <https://www.miljomal.se/miljomalen/12-levande-skogar/>

- Nationalencyklopedin (uå b) Torrdeposition. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/v%C3%A5tdeposition>
- Nationalencyklopedin (uå a) Våtdeposition. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/v%C3%A5tdeposition>
- Naturvårdsverket (2003) Bara naturlig försurning. Naturvårdsverket. Rapport: 5317.
- Naturvårdsverket (2017a) Bara naturlig försurning. <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Miljokvalitetsmalen/Bara-naturlig-forsurning/>
- Naturvårdsverket (2017b) Markförsurning i skogslandskapet. <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Miljoovervakning/Bedomningsgrunder/Skogslandskap/Markforsurning/>
- Naturvårdsverket (2017c) Svaveldioxidutsläpp till luft. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Svaveldioxid-till-luft/>
- Naturvårdsverket (2017d) Utsläpp av kväveoxider till luft. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Kvaveoxid-till-luft/>
- Nilsson, T., Johansson, M.-B. & Nilsson, Å (2007) Trädslagets betydelse för markens syra-basstatus - resultat från Ståndortskareringen. Skogsstyrelsen. Rapport: 2. <https://shopcdn.textalk.se/shop/9098/art33/4646133-1ecab2-1779.pdf>
- Nordwall, F. (2014a) Havs och vatten myndigheten. <https://www.havochvatten.se/hav/fiske--fritid/miljopaverkan/havsforurning.html>
- Nordwall, F. (2018b) Havs och vatten myndigheten. <https://www.havochvatten.se/hav/fiske--fritid/miljopaverkan/forsurning-av-sjoar-och-vattendrag/biologiska-effekter-av-forsurningen.html>
- Petersson, G. (2006) Kemisk miljövetenskap. 6. Uppl. Chalmers.
- Mani, P.K. (2014) Problem soils. Onlineföreläsning. <https://www.sli-deshare.net/pabitramani/problem-soils-and-soil-acidity>
- SFS 2016:831 (2016) Luftkvalitetsförordning. Miljö- och energidepartementet.
- Skyllberg, U., Jacks, G. & Westling, O. (2001) Markförsurningsprocesser. Skogsstyrelsen. Rapport: 11B. <https://shopcdn.textalk.se/shop/9098/art37/4646037-7e6e4b-1687.pdf>
- Strålsäkerhetsmyndigheten (2018) Hantering av torv- och trädbränsleaska. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/torv--och-tradbransleaska/>
- Svenska miljöinstitutet (2015) MAGIC-biblioteket. <https://www.ivl.se/vart-erbjudande/vara-omraden/miljodata/magic-biblioteket.html>
- Sveriges miljömål (uå) Nedfall av svavel. <http://sverigemiljomal.se/miljomalen/bara-naturlig-forsurning/nedfall-av-svavel/>
- Wällstedt, T. (2010) Oönskade effekter av kalkning. Kapitel 5 i rapporten Utvärdering av IKEU 1990-2006. Syntes och förslag. Naturvårdsverket Rapport 6302: 538-549.
- UNDP (uå) Globala målen. <http://www.globalamalen.se/om-globala-malen/>

Referenser till kapitel 4

- Benchrif, A., Wheida, A., Tahri, M., Shubbar, R.M. & Biswas, B. (2021) Air quality during three covid-19 lockdown phases: AQI, PM_{2.5} and NO₂ assessment in cities with more than 1 million inhabitants. *Sustain Cities Soc.* 74:103170. doi: 10.1016/j.scs.2021.103170
- Blanck, S (2008) Nedbrytning och rörlighet av bensen, toluen, etylbensen och xylener i mark – en jämförelse mellan simulerade spill av bensen och E85. Projektrapport examensarbete i ekotoxikologi, Uppsala universitet. p 44.

- Boverket (2016) Småskalig vedeldning. Boverket. ISBN 978-91-7563-356-5.
- Boverket (2017) Konsekvensutredning BBR 25. Boverkets föreskrifter om ändring i verkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd.
- Chow, F.K., De Wekker, S.F.J. & Snyder, B.J. (2013) Mountain Weather Research and Forecasting. <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-4098-3>.
- Estrada, J.M. & Bhamidimarri, R. (2016) A review of the issues and treatment options for wastewater from shale gas extraction by hydraulic fracturing. *Fuel*. 182: 292-303.
- EU:s luftkvalitetsdirektiv (2015) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02008L0050-20150918>.
- Gipperth, L. & Pleijel, H. (2008). Har miljö kvalitetsnormer förbättrat utomhusluften? Naturvårdsverket. ISBN 978-91-620-5915-6.
- Granström, K. (2016) Introduktion till miljö kemi. 1 uppl. Lund: Studentlitteratur. ISBN 978-91-44-09728-2
- Gustafsson, M., Forsberg, B., Orru, H., Åström, S., Tekie, H. & Sjöberg, K. (2010) Quantification of population exposure to NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ and estimated health impacts in Sweden 2010. p 74.
- Johansson, C. & Mårtensson, M. (2015a) Gränsskiktmeteorologi. Kurskompendium, SLU.
- Johansson, C. & Mårtensson, M. Spridning av luftföroreningar (2015b) Kurskompendium SLU.
- Laggren, A. (2014) Avsättningsmöjligheter för slaggrus från avfallsförbränning vid Åmotfors Energi. Civilingenjörsprogrammet i energisystem. Examensarbete 2014:11. ISSN 1654-9392. SLU, Uppsala.
- Laurin, S. & Färnlöf, S. (1994) Meteorologi- ett häfte om väder och klimat från SMHI. https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.129334!/Meteorologi_ett_hafte-om_vader_och_klimat.pdf
- MSB (2010) Saneringsmanual för olja på svenska stränder. MSB 0134-09. <https://www.msb.se/contentassets/e3ebc928de964a5eb1e5aee0a9ecb83e/14-saneringsmanual-olja-svenska-strander.pdf>
- MSB (2019) Kommunens oljeskydd. En pärm med råd till räddningstjänst och miljökontor. <https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/cbrne/oljeskadeskydd/kommunens-oljeskadeskydd/>
- Nationalencyklopedin (uå) Uppslagsverk – online.
- Naturvårdsverket (2009) Elda rätt: Råd för effektiv, miljöanpassad och säker eldning med ved och andra vedbaserade bränslen, i vedpanna, kamin och dylikt. Naturvårdsverket. <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-8392-2.pdf>.
- Naturvårdsverket (2017a) Gifter & miljö: kemikalier i vardagen. Naturvårdsverket. ISBN 978-91-620-1301-1.
- Naturvårdsverket (2017b) Luft & miljö 2017: barns hälsa : om luftmiljö och svensk luftövervakning. Naturvårdsverket. ISBN 978-91-620-1303-5.
- Naturvårdsverket (2018) Miljömålen: årlig uppföljning av Sveriges nationella miljömål 2018 - med fokus på statliga insatser. Naturvårdsverket. ISBN 978-91-620-6833-2.
- Naturvårdsverket (2018a) Fakta om kolväten i luft. Naturvårdsverket. <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftforeningar/Kolvaten/>.
- Naturvårdsverket (2020a) Sot, utsläpp till luft. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/luft/utslapp/sot-utslapp-till-luft/>

- Naturvårdsverket (2020b) Utsläpp av luftföroreningar i Sverige. Fördjupad trendanalys av historiska och framtida utsläpp av luftföroreningar i Sverige. Naturvårdsverket Rapport 6915. Februari 2020.
- Naturvårdsverket (uåa) EU:s direktiv för utsläpp av luftföroreningar. <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/luft/internationellt-arbete-med-luft/eus-direktiv-for-utslapp-av-luftfororeningar/>
- Naturvårdsverket (uåb) Fakta om marknära ozon. <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/luft/luftfororeningar-och-dess-effekter/fakta-om-marknara-ozon/>
- Naturvårdsverket (uåc) Partiklar (PM_{2,5}) i regional bakgrund (årsmedelvärden). <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/luft/partiklar-pm25-halter-i-luft-regional-bakgrund-arsmedelvarden/>
- Nordling, A. (2015) Skiffergas i världen – dagens spridning och framtida potential. En uppdatering. Energigas Sverige & Svensk Energi. ÅF. Projektledare Anna Nordling. <https://www.energigas.se/library/1993/skiffergas.pdf>
- Persson, A. (2017) Dioxiner och dioxinlika PCB. <https://ki.se/imm/dioxiner-och-dioxinlika-pcb>
- Persson, T. & Win, K. M. (2011) Småskalig rökgasrening: metoder för att minska utsläppen från småskalig biobränsleeldning. Region Gävleborg. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:du-5660>.
- Petäjä, T., Järvi, L., Kerminen, V.-M., Ding, A.J., Sun, J.N., Nie, W., Kujansuu, J., Virkkula, A., Yang, X., Fu, C.B., Zilitinkevich, S. & Kulmala, M. (2016) Enhanced air pollution via aerosol-boundary layer feedback in China. *Scientific Reports*, 6, p 18998.
- Petersson, G. (2008) Luftföroreningar och bränslen. Kemisk miljövetenskap, Chalmers, <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/72653.pdf>
- Regeringen (2017) SOU 2017:83 Brännheta skatter! Bör avfallsförbränning och utsläpp av kväveoxider från energiproduktion beskattas? ISBN 978-91-38-24690-0.
- Regeringskansliet (uå) Agenda 2030, Mål 3, Hälsa och välbefinnande. <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/17-globala-mal-for-hallbar-utveckling/>
- Rönning, C. (2014) Skiffergas – en framgångssaga med miljökonsekvenser. Svenska Yle, utrikesnyheter. <https://svenska.yle.fi/a/7-782438#:~:text=De%20st%C3%B6rsta%20fyndigheterna%20av%20skiffergas,fyndigheterna%20grundligt%20med%20tusentals%20borrningar.>
- SGU (uå) Skiffergas. Faktasida från SGU, Sveriges geologiska undersökning. <https://www.sgu.se/samhallsplanering/energi/skiffergas>.
- Shariatdoost, A.S., Yousefi, M., Derakhshi, P., Safekordi, A., & Larjani, L. (2018) Synthesis of NiFe₂O₄/sawdust nanocomposite for oil-water separation. *J. Nanoanalysis* 5(1):1-6. DOI: 10.22034/jna.2018.541844
- SMHI (2011) Sot. SMHI:s kunskapsbank. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/kortlivade-klimatpaverkande-luftfororeningar-slcp/sot-1.99800>.
- SMHI (2014) Bensen. <http://www.smhi.se/reflab/om-luftfororeningar/luftfororeningar/bensen-1.19673>
- SMHI (uåa) Inversion. Fakta från SMHI:s kunskapsbank. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/inversion-1.28269>.
- SMHI (uåb) Ozon. Från SMHI:s kunskapsbank. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/ozon-1.3824>
- Sveriges avfallsportal (uå) Förbränning | Sopor.nu. <https://www.sopor.nu/fakta-om-sopor/vad-haender-med-din-sopa/restavfallet/foerbraenning/>

- Swietlicki, E. (2013) Partiklar i atmosfären påverkar klimatet. Klimat i fokus, Hållbarhetsforum, Centrum för miljö- och klimatforskning, Lunds universitet. 3 sidor. Utsläppsregistret (uå) Utsläpp i siffror. Svenska utsläppsregistret. Naturvårdsverket <https://utslappisiffror.naturvardsverket.se/sv/Sok/>
- Vengosh, A., Jackson, R.B., Warner, N., Darrah, T.H. & Kondash, A. (2014) A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States. *Eviron. Sci. Technol.* 48(15):8334-8348. <https://doi.org/10.1021/es405118y>

Referenser till kapitel 5

- Biofuels (2008a). Feedstock. <https://www.greenfacts.org/glossary/def/feedstock.htm>
- Biofuels (2008b). How will biofuel production affect water resources? <https://www.greenfacts.org/en/biofuels/1-3/4-environmental-impacts.htm>
- Biofuels (2008c). How will biofuel production affect soils? <https://www.greenfacts.org/glossary/def/feedstock.htm>
- Breitburg, D., Levin, L.A., Oshlies, A., Grégoire, M., Chavez, F.P., Conley D.J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G.D., Limburg, K.E., Montes, I., Naqvi S.W.A., Pitcher, G.C., Rabalais, N.N., Roman, M.R., Rose, K.A., Seibel, B.A., Telszewski, M., Yasuhara, M. & Zhang, J. (2018) Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371): 11pp. <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>
- Choudhury, M.I. (2018) Nitrogen removal by wetlands in a cold climate. Understanding interactions between macrophytes and microorganisms. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala 2018:48. https://pub.epsilon.slu.se/15696/1/choudhury_m_20181009.pdf
- Eurostat (uå) Energy balance flow for SE 2019. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/energy/sankey.html?geos=SE&year=2019&unit=GWh&fuels=RA000&highlight=_5_6_4_8_&nodeDisagg=1111111111111&flowDisagg=true&translateX=84.83986740936957&translateY=-12.696323258276323&scale=1.5157165665103982&language=EN
- Exxon Mobil (uå) Exxon Mobil. <https://corporate.exxonmobil.com/en/research-and-technology/advanced-biofuels/advanced-biofuels-and-algae-research#/section/1-algae-for-biofuels-production>
- Haas, BP. (2010) Ethanol Biofuel Production. Nova Science Publishers Inc, New York
- Hagström, P. (2006) Fakta Skog, Umeå: SLU.
- Hammar, T. (2018) Institutionen för energi och teknik. 2018 Föreläsning LCA och bioenergi.
- Helsinki Commission (2015) Updated Fifth Baltic Sea pollution load compilation (PLC-5.5) Baltic Sea Environment Proceedings No. 145. http://www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP145_Lowres.pdf
- Hill, J., Nelson, E. & Tilman, D. (2006) Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. <http://www.pnas.org/content/103/30/11206.full>
- Hillestad, M. E. & Hageberg, E. (2013) Biobränsle eller mat - ett dilemma att lösa. ATL, <https://www.atl.nu/biobransle-eller-mat-ett-dilemma-att-losa>
- Jordbruksverket (2014) Utsläpp av växthusgaser från torvmark, Jönköping: Jordbruksverket. https://www2.jordbruksverket.se/download/18.64f2616c14acd372c5c4391c/1420810674894/ra14_24.pdf

- Klimatet och skogen (2017) Kolcykeln och skogen. <http://klimatetochskogen.nu/bakgrundsinformation/kolcykeln>
- Larsson, S., Lundmark, T. & Ståhl, G. (2009) Möjligheter till intensivodling av skog. Slutrapport från regeringsuppdrag Jo 2008/1885. <https://www.slu.se/globalassets/ew/org/inst/esf/forsoksparker/asa/mint-rapport.pdf>
- Lindström, V., Öberg, C., Larsson, J., Hallén, A., Kandiel, H., Breimark, O. & Silfver, E. (2017) En studie om förnybara drivmedel och dess förutsättningar i norra Sverige. <http://biofuelregion.se/wp-content/uploads/2017/02/2017-Studie-om-fornybara-drivmedel-och-forutsattningar-i-norra-Sverige.pdf>
- Miljömål (2018) Marknära ozon. <https://www.miljomal.se/Miljomalen/Alla-indikatorer/Indikatorsida/?iid=104&pl=1>
- Miljönytta (2016) Mikroalger växer på rökgaser och avloppsvatten. <http://miljonytta.se/biobranslen/mikroalger-vaxer-pa-rokgaser-och-avloppsvatten/>
- Nationalencyklopedin (2018) Nationalencyklopedin. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/torv>
- Naturvårdsverket (2005) Förbränningsanläggningar för energiproduktion inklusive rökgaskondensering. <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-8196-9.pdf>
- Naturvårdsverket (2017) Fossila bränslen. <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Energi/Fossila-branslen/>
- Naturvårdsverket (2017a) Utsläpp av flyktiga organiska ämnen till luft. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Flyktiga-organiska-amnen-utslapp-till-luft/>
- Naturvårdsverket (2017a) Utsläpp i siffror - Kväveoxider (NO_x). <https://utslappisiffror.naturvardsverket.se/Amnen/Andra-gaser/Kvaveoxider/>
- Naturvårdsverket (2017b) Marknära ozon, regional bakgrund (maximala åttatimmarsmedelvärden). <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Ozon-maximala-8-timmarsmedelvarden-i-regional-bakgrund-halter-29/>
- Naturvårdsverket (2017b) Utsläpp av kväveoxider till luft. <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Kvaveoxid-till-luft/>
- Naturvårdsverket (2017c) Exponering av marknära ozon, SOMO35. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Ozon---marknara-exponering-SOMO35/>
- Naturvårdsverket (2017c) Översiktligt om kväveoxidavgiften. <http://www.naturvardsverket.se/nox>
- Naturvårdsverket (2018) Fakta om tungmetaller i luft. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftforeningar/Tungmetaller/>
- Naturvårdsverket (2018) Miljömålen - Rapport 6804. https://www.miljomal.se/Global/24_las_mer/rapporter/malansvariga_myndigheter/2018/au2018.pdf
- Naturvårdsverket (2018) Miljömålen: årlig uppföljning av Sveriges nationella miljömål 2018 - med fokus på statliga insatser. Stockholm: Naturvårdsverket. ISBN 978-91-620-6804-2.
- Naturvårdsverket (2018a) Marknära ozon. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Luftforeningar/Marknara-ozon/>
- Naturvårdsverket (2018b) Miljökvalitetsnormer för utomhusluft. <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Luft-och-klimat/Miljokvalitetsnormer-for-utomhusluft/>
- Naturvårdsverket (2018c) Ozonskiktet. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Ozonskiktet/>

- Naturvårdsverket (2018d) Sammanställning av miljö kvalitetsnormer. <http://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/miljokvalitetsnormer/mkn-luft/sammanst-miljokvalitetsnormer.pdf>
- Naturvårdsverket (2018e) Miljömålen. Naturvårdsverket. Rapport 6833.
- Palash, S.M., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Masum, B.M., Rizwanul Fattah, I.M. & Mofijur, M. (2013) Impacts of biodiesel combustion on NO_x emissions and their reduction approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23:473-490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113001524>
- Passoth, V. (2014) *Molecular Mechanisms in Yeast Carbon Metabolism*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schoning, K. (2014) Torvtillväxt och kolackumulation hos unga torvmarker i Uppland, Uppsala. Sveriges geologiska undersökning, SGU-rapport 2014:35. <http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s1435-rapport.pdf>
- Skogsindustrierna (2007) Fordonsbränslen från skogsråvara – olika tekniker, utvecklingsstatus, kostnader och behov av skogsråvara. Skogsindustrierna. <https://www.skogsindustrierna.se/siteassets/dokument/rapporter/fordonsbransle-fran-skogsravara.pdf>
- SLU (2013) Varför olika syn på intensivt skogsbruk? <https://www.slu.se/centrumbildningar-och-projekt/future-forests/nyheter-fran-future-forests/2013/10/varfor-olika-syn-pa-intensivt-skogsbruk/>
- SMHI (2016) Vad är det för skillnad mellan miljö kvalitetsnormer och miljömål? <http://www.smhi.se/reflab/kontakta-oss-garna/fragor-och-svar/vad-ar-det-for-skillnad-mellan-miljokvalitetsnormer-och-miljokvalitetsmal-1.104158>
- SMHI (2018a) Ozon. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/ozon-1.3824>
- SMHI (2018b) Ozonskiktet och klimatet. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/ozonskiktet-och-klimatet-1.3830>
- Svebio (2017) 2016 rekordår för biodrivmedel i Sverige. <https://www.svebio.se/press/pressmeddelanden/2016-rekordar-biodrivmedel-sverige/>
- Svebio (2020) Färdplan bioenergi – så möter vi behovet av bioenergi för fossilfritt Sverige. Rapport från Svebio. <https://www.svebio.se/app/uploads/2020/03/Svebio-Fa%CC%88rdplan-Bioenergi-2020-1.pdf>
- Svenska Dagbladet (2007) Myr håller kvar koldioxiden. <https://www.svd.se/myr-haller-kvarkoldioxiden>
- Sveriges miljömål (2018) Frisk luft. <http://sverigesmiljomal.se/miljomalen/frisk-luft/>
- Sveriges miljömål (uå) Preciserings av Frisk luft. <http://sverigesmiljomal.se/miljomalen/frisk-luft/preciseringar-av-frisk-luft/>
- Sveriges radio (2015) Intensivare skogsbruk kan lagra Sveriges koldioxidutsläpp. <https://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=406&artikel=6336448>
- Sveriges Riksdag (2010) https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/luftkvalitetsforordning-2010477_sfs-2010-477
- Tekniska Verken (2014) Kraftvärmeverket samt HVC 10 Linköping: Miljörapport 2014 <https://www.tekniskaverken.se/contentassets/1f42acc889df4c6cbab71ab63ae8ac6f/miljorapport-2014-kraftvarmeverket-och-hvc-10-32371.pdf>
- WHO (2013) Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP project. (Rapport). Köpenhamn: WHO.

- WWF (2018) Övergödning och algblomning <http://www.wwf.se/wwfs-arbete/hav-och-fiske/radda-ostersjon/minska-overgodningen/1133391-overgodning-och-algblomning>
- Zhang, H., Zeng, F., Zou, Z., Zhang, Z. & Li, Y. (2017) Nitrogen uptake and transfer in a soybean/maize intercropping system in the karst region of southwest China. *Ecology and Evolution*, 7(20), ss. 8419–8426.

Referenser till kapitel 6

- Ahmed, A.A. & Ismail, U.H.A.E. (2008) Sediment, in the Nile river system. UNESCO International Hydrological Programme, International Sediment Initiative. <http://isi.irtces.org/isi/rootfiles/2017/07/04/1487239390040025-1498713525648280.pdf>
- Abril, G., Gu´rin, F., Richard, S., Delmas, R., C Galy-Lacaux, P Gosse, A Tremblay, L Varfalvy, MA Dos Santos & Matvienko, B. (2005) Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit saut, French Guiana). *Global Biochemical Cycles* 19: GB4007. <https://doi.org/10.1029/2005GB002457>
- Baran, E. & Ratner, B. (2007) World fish center. http://pubs.iclarm.net/resource_centre/DonSahong-final.pdf
- Bartle, A. (2002) Hydropower potential and development activities, Surrey: Aqua-Media International Ltd.
- Energimyndigheten (2014) Vad avgör ett vattenkraftverks betydelse för elsystemet – underlag till nationell strategi för åtgärder inom vattenkraften ER 2014:12. <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/nyheter/2014/vad-avgor-ett-vattenkraftverks-betydelse-for-elsystemet.pdf>
- Haglund A-L, D Lundvall & J Berglund (2018) Dalälvens naturvärden - Påverkan från vattenkraften, åtgärdsbehov och prioriterade miljöåtgärder. Länsstyrelsen Dalarnas län Rapport 2018-05. <https://www.lansstyrelsen.se/dalarna/tjanster/publikationer/2018/dalalvens-naturvarden---paverkan-fran-vattenkraften-atgardsbehov-och-prioriterade-miljoatgarder.html>
- Havs- och vattenmyndigheten (uå) Nationell plan för moderna miljövillkor för vattenkraften. <https://www.havochvatten.se/vattenkraft-och-arbete-i-vatten/vattenkraftverk-och-dammar/nationell-plan-for-omprovning-av-vattenkraft/nationell-plan-for-omprovning-av-vattenkraft.html#h-Tidplanforprovningssgrupper>
- Havs- och vattenmyndigheten, (2018) Atlantisk och europeisk stör. <https://www.havochvatten.se/hav/fiske--fritid/arter/arter-och-naturtyper/atlantisk-och-europeisk-stor.html>
- Huang, D., Wei, W. & Zhang, Y. (2011) Discussion of small-scale hydropower station and ecological protection in Northern Guangdong: Ruyuan County as an example, Xi'an, Kina: IEEE.
- Jonsson, M. (2015) Rikedomar runt rinnande vatten. Naturskyddsföreningen.
- Kallio, M. (2014) Effects of Mining and Hydropower on Metals in Surface Waters: Case: NamNgum, Bachelor Thesis, Helsingfors: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. 75 sidor <https://www.theseus.fi/handle/10024/75687>
- Kemikalieinspektionen (2015) KEMI kemikalieinspektionen. <https://www.kemi.se/priorstart/kriterier/prio-amnens-egenskaper/sarskilt-farliga-metaller>
- Malm-Renöfält, R. B., Jansson, R. & Ahonen, J. (2015) Ekologisk återställning i helt eller delvis torrlagda fåror i anslutning till vattenkraftverk, Havs och vatten myn-

- digheten Rapport 2015:22 <https://www.havochvatten.se/data-kartor-och-rapporter/rapporter-och-andra-publikationer/publikationer/2015-12-14-ekologisk-aterstallning-i-helt-eller-delvis-torrlagda-faror-i-anslutning-till-vattenkraftverk.html>
- Molander S, H Ahlberg, R Arvidsson & L Hammar (2010) Förnybara energikällors inverkan på de svenska miljömålen. Naturvårdsverket Rapport 6391. ISSN 0282-7298. 53 sidor. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1618232/FULLTEXT01.pdf>
- Morin, F. (2006) Vattenkraft samhällsekonomiskt lönsamt? En studie om hur samerna, sprotfisketurismen och miljön påverkas av en vattenkraftsutbyggnad i Kalixälven. C-uppsats, Samhällskunskap, 2006:010, Luleå tekniska universitet. ISSN: 1402-1773
- Näslund, I., Kling, J. & Bergengren, J. (2013) Vattenkraftens påverkan på akvatiska ekosystem - en litteratursammanställning, Havs och vattenmyndigheten. <https://www.havochvatten.se/data-kartor-och-rapporter/rapporter-och-andra-publikationer/publikationer/2013-10-15-vattenkraftens-paverkan-pa-akvatiska-ekosystem.html>
- Naturskyddsföreningen (uå) Hur fungerar vattenkraft. <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/hur-fungerar-vattenkraft/>
- Nixon SW (2003) Replacing the Nile: Are Anthropogenic Nutrients Providing the Fertility Once Brought to the Mediterranean by a Great River? *AMBIO* 32(1):30-39 (2003). <https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.1.30>.
- Noring H. (2015) Metylkviksilvers toxicitet. Kandidatarbete i veterinärmedicin. 2015:50 <https://stud.epsilon.slu.se/7858/>
- Orring, A. (2012) Bara ett av tio vattenkraftverk har fiskpassage. *Ny Teknik*, 6 November.
- Palmé, A., Wennerström, L., Guban, P., Rymna, N. & Laikre, L. (2012) Compromising Baltic salmon genetic diversity – conservation genetic risks associated with compensatory releases of salmon in the Baltic Sea. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2012:18.
- Petersson, S. (2014) Fiskars val av passage förbi ett vattenkraftverk där två alternativ finns tillgängliga, Karlstad: Karlstads universitet.
- Rivinoja, P. (2015) Effekter av faunapassager, Sundsvall: SWECO.
- SLU Artfakta (2015) Flodpärlmussla, SLU. <https://artfakta.se/naturvard/taxon/margaritifera-margaritifera-101268>
- Sparrevik, E., Viklands, H., Bergsten, P. & Harju, L. (2011) Ekologiska effekter och verksamhetspåverkan av förändrade produktionsvillkor i Vattenfalls storskaliga vattenkraftverk, Vattenfall.
- Sparrevik, N. (2009) Miljöförbättrande åtgärder för vattenkraft - värdering av ekologiska effekter och verksamhetspåverkan - EXTERN. Vattenfall.
- St. Louis, VL, CA Kelly, É Duchemin, JWM Rudd & DM Rosenberg (2000) Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate. *BioScience*, 50(9): 766–775
- Svensk Energi (2015) Energiföretagen. https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/bilder/potential-att-utveckla-vattenkraften.pdf?v=yT3B3GaCu9E_DpTjoYB6rwivmV0
- Svenska FN-förbundet (2018) FN-förbundet. <https://fn.se/globala-malen-for-hallbar-utveckling/>

- Sveriges Domstolar (2021) Moderna miljövillkor – Nationella planen.
<https://www.domstol.se/amnen/mark-och-miljo/miljotillstand/moderna-miljovillkor---nationella-planen/>
- Sveriges Radio (2016) Klådris är växternas ”ensamvarg”. <https://sverigesradio.se/artikel/6451491>
- Tunde, A.O. (2005) Small hydro schemes - taking Nigeria's energy generation to the next level, Durban, Sydafrika: IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1611797>
- Vattenkraftens miljöfond (uå) <https://vattenkraftensmiljofond.se/>
- Wood A (2012) The baiji – the first dolphin to be declared extinct in modern times.WDC. <https://uk.whales.org/case-study/baiji-first-dolphin-to-be-declared-extinct-in-modern-times>
- World Energy Council (2016) World Energy Council.
https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Hydro-power_2016.pdf
- WHO (2017) Mercury and health. World Health Organization.
<http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- Zinko (2005) Strandzoner längs skogsvattendrag. Världsnaturfonden WWF.
- Ålvräddarna (uå) Om vattenkraft. <https://alvraddarna.se/fakta/om-vattenkraft/>

Referenser till kapitel 0

- Agora Energiewende (2015) Understanding the Energiewende. FAQ on the ongoing transition of the German power system. https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2015/Understanding_the_EW/Agora_Understanding_the_Energiewende.pdf
- Analysgruppen (KSU) (2009) Uran. <http://analys.se/wp-content/uploads/2015/05/uran-bakgrund2009-1.pdf>
- Andersson, P., Ardhammar, M., Nielsen, F. & Peterson, J. (2013) Upparbetning av utbränt kärnbränsle En studie med fokus på exportkontroll. Strålsäkerhetsmyndigheten. Rapport 2013:32 <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/6eed6d8f4a5842969b18a3101cd2e2c8/201332-upparbetning-av-utbrant-karnbransle---en-studie-med-fokus-pa-exportkontroll>
- Berntsson, L. (2018) Vattentemperaturen stiger – Ringhals 2 tas ur drift.
<https://www.svt.se/nyheter/lokalt/halland/vattentemperaturen-stiger-ringhals-2-tas-ur-drift>
- Björklund, S. (2018) E-post med SKB. Frågor om transporter.
- Borovoi, A. A. & Gagarinskii, A. Y. (2001) Emission of radionuclides from the destroyed unit of the Chernobyl nuclear power plant. Atomic Energy, 90 (2), ss. 137-145. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1011357209419.pdf>
- BP (2017) BP Statistical Review of World Energy 2017. <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
- D’Emilia, P. (2015) Fukushima. <https://uraccess.net/products/193985>
- Dahlin, N. (2016) Tjernobyl: Den omöjliga katastrofen. Ny Teknik. <https://www.nyteknik.se/teknikhistoria/tjernobyl-den-omojliga-katastrofen-6422752>
- Deutsches Atomforum (2013) Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken.
<http://www.kernfragen.de/sites/default/files/media/publication/file/060rueckbau-von-kkw.pdf>

- Ehlin, U., Lindahl, S., Neuman, E., Sandström, O. & Svensson J. (2009) Miljöeffekter av stora kylvattenutsläpp. <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/19898/miljoeffekter-av-stora-kylvattenutslapp-elforskrapport-2009-79.pdf>
- Energiföretagen (2017) Kärnkraften och avfallet. <https://www.energiforetagen.se/sa-fungerar-det/el/produktion/karnkraft/karnkraften-och-avfallet/>
- Energimyndigheten (2018) Energiläget 2018 - En Överblick. <https://energimyndigheten.a-w2m.se/FolderContents.mvc/Download?ResourceId=5751>
- Fritzson, K. (2013) Radioaktivt cesium i vildsvin – variabler som påverkar halterna av cesium-137 i vildsvin (*Sus scrofa*) https://pub.epsilon.slu.se/10990/1/fritzson_k_140127.pdf
- IAEA (2001) The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste, IAEA-TECDOC-1243
- IEA (2018a) Statistics, share of electricity generation by fuel, world. <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2015&category=Key%20indicators&indicator=undefined&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=ELECTRICITYANDHEAT&showDataTable=false>
- IEA (2018b) Statistics, share of electricity generation by fuel, France. <https://www.iea.org/statistics/?country=FRANCE&year=2015&category=Key%20indicators&indicator=undefined&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=ELECTRICITYANDHEAT&showDataTable=false>
- Joelsson, J. (2012) Tillbaka till framtiden. Magasin Ping, nr 3. https://issuu.com/diksnack/docs/ping_nr3-12_web
- Karlsson, M. & Säljö, N. (2014) Analys av kärnkraftsolyckan i Fukushima. <http://lnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:719995/FULLTEXT01.pdf>
- King, F., Ahonen, L., Taxén, C. & Vuorinen, U. (2001) Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository. SKB Technical Report TR-01-23. <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-01-23.pdf>
- Lindholm, K. (2017) Uran. <https://www.energiforetagen.se/sa-fungerar-det/el/produktion/karnkraft/uran/>
- Livsmedelsverket (2018) Radioaktivt cesium i vildsvin. <https://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/oonskade-amnen/radioaktivitet-och-bestralning/radioaktivt-cesium-i-vildsvin-fragor-och-svar>
- Livsmedelsverket (2022) Radioaktivt cesium i vildsvin. <https://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/oonskade-amnen/radioaktivitet-och-bestralning/radioaktivt-cesium-i-vildsvin-fragor-och-svar>
- Lundberg, F. (2020) Bara en enda kärnkraftsreaktor igång i Japan. Sveriges Natur 6 november 2020. <https://www.sverigesnatur.org/aktuellt/bara-en-enda-karnkraftsreaktor-igang-i-japan/>
- Moberg, L. (2001) Kärnkraftsolyckan i Tjernobyl. En sammanfattning femton år efter olyckan. Stockholm: Statens strålskyddsinstitut (SSI Rapport 2001:07). <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/851ffbd3495d42f2b3db64c62dd89c72/200107-karnkraftsolyckan-i-tjernobyl.-en-sammanfattning-femton-ar-efter-olyckan>
- Moomaw, W., Burgherr, P., Heath, G., Lenzen, M., Nyboer, J. & Aviel Verbruggen (2011) Methodology . IPCC. (Annex II) http://www.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Annex_II.pdf

- Naturvårdsverket (2018) Allt du behöver veta om kärnkraftens framtid. https://www.naturskyddsforeningen.se/karnkraft?gclid=CjwKCAjw85zdBRB6EiwAov3RipLR8CGKVRSFqo8zdMfl79BrI-IrwFudimFmPJCXKgsC7vPRWh_1R2hoCBTUQAvD_BwE
- Naturvårdsverket (2018) Miljömålen Årlig uppföljning av Sveriges nationella miljömål 2018 – Med fokus på statliga insatser RAPPORT 6804. https://www.miljomal.se/Global/24_las_mer/rapporter/malansvariga_myndigheter/2018/au2018.pdf
- NEA & IAEA (2016) Uranium 2016: Resources, Production and Demand. NEA (No 7301). <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>
- OKG (2010) Miljö och klimatpåverkan från kärnkraft. Oskarshamns Kärnkraftsgrupp. http://www.okg.se/Documents/Miljo/LCA_fordjupning.pdf
- OKG (2017) Kompletta frågor och svar. Oskarshamns Kärnkraftsgrupp. <http://www.okg.se/sv/Skola/Fragor-och-svar/Kompletta-fragor-och-svar/#Upp>
- Pöllänen, R., Toivonen, H. & Valkama, I. (1997) Transport of radioactive particles from the Chernobyl accident. *Atmospheric Environment*, 31(21): 3575-3590. https://ac.els-cdn.com/S1352231097001568/1-s2.0-S1352231097001568-main.pdf?_tid=098c2d63-6ac1-48eb-a189-de48d3691912&ac-dnat=1537366103_09cafb091ff8fdb70fc0398fb3057c7
- Rademaekers, K., van der Laan, J., Boeve S., Lise, W. & Kirchsteiger, C. (2011) Investment needs for future adaptation measures in EU nuclear power plants and other electricity generation technologies due to effects of climate change. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2011_03_eur24769-en.pdf
- Sesma Martín, D. & del Mar Rubio-Varas, M. (2016) Freshwater for Cooling Needs: A Long-Run Approach to the Nuclear Water Footprint in Spain. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800916314094>
- SGU (2016) Mineralmarknaden 2015 - Tema: energimetaller. <http://resource.sgu.se/produkter/pp/pp2016-2-rapport.pdf>
- SGU (2018) Från istid till nutid. <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/>
- SGU (uå) Uran. <https://www.sgu.se/samhallsplanering/energi/uran/>
- SKB (2007) Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall.
- SKB (2008) Bevarande av information om slutförvar för använt kärnbränsle – förslag till handlingsplan. <http://www.skb.com/publication/1764036/P-08-76.pdf>
- SKB (2014) Klarhet i omstridd korrosionsfråga. <http://www.skb.se/nyheter/klarhet-i-omstridd-korrosionsfraga/>
- SKB (2016a) Mellanlagret Clab. <http://www.skb.se/anlaggningar-i-drift/mellanlagret-clab/>
- SKB (2016b) Svenska systemet. <http://www.skb.se/anlaggningar-i-drift/svenska-systemet/>
- SKB (2016c) Så valdes Forsmark. <https://www.skb.se/projekt-for-framtiden/karnbransleforvaret/bakgrund/>
- SKB (2017) Slutförvaret SFR. <https://www.skb.se/anlaggningar-i-drift/slutforvaret-sfr-2/>
- Sremc (2018) Kyshtym-olyckan – 60 år har gått. <https://sremc-kcrn.org/2018/07/26/kyshtym-olyckan-60-ar-har-gatt/>
- Strålsäkerhetsmyndigheten (2016) Genomförande av Agenda 2030. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/46f240e1fbd14c17b10e4c039bea2127/genomforande-av-agenda-2030.pdf>

- Strålsäkerhetsmyndigheten (2017a) Kärnbränsle. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/sa-fungerar-ett-karnkraftverk/karnbransle/>
- Strålsäkerhetsmyndigheten (2017b) Kärnkraftsolyckor i världen. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/om-stralning/ines-skalan/>
- Strålsäkerhetsmyndigheten (2017c) INES-Skalan. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/karnkraftsolyckor-i-varlden/>
- Strålsäkerhetsmyndigheten (2017d) Kärnbränsle. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/sa-fungerar-ett-karnkraftverk/karnbransle/>
- Strålsäkerhetsmyndigheten (2018) Avveckling av kärnkraftverk och andra kärntekniska anläggningar. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/det-har-inspekterar-och-granskar-vi/avveckling-av-karnkraftverk-och-andra-karntekniska-anlaggningar/>
- Stuk (uå) Exempel på stråldoser. <https://www.stuk.fi/sv/web/selkosivut/stralrisk-och-skydd/exempel-pa-straldoser>
- Svens, H. (2015) Finland ska lagra kärnavfall i hundratusentals år. SVT Nyheter. <https://www.svt.se/nyheter/utrikes/finland-ska-lagra-karnavfall-i-en-miljon-ar>
- Sveriges miljömål (2018) Cesium-137 i mjölk. <http://sverigesmiljomal.se/miljomalen/saker-stralmiljo/cesium-137-i-mjolk/>
- Szakalos, P., Hultquist, G. & Wikmark, G. (2007) Corrosion of Copper by Water. *Electrochemical and Solid State Letters*.
- Thorium report committee (2008) Thorium as an Energy source – Opportunities in Norway. <https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/oed/rapporter/thoriumreport2008.pdf>
- Tokyo Electric Power Company (2011) The Evaluation Status of Reactor Core Damage at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1 to 3. http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_111130_04-e.pdf
- UNSCEAR (2012) The Chernobyl accident. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>
- Wall, A. (uå) Top 10 Nuclear Disasters. <http://www.processindustryforum.com/hottopics/nucleardisasters>
- van Vliet, M.T.H. Yearsley, J.R., Ludwig, F., Vögele, S., Lettenmaier D.P. & Kabat P. (2012) Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. <https://www.nature.com/articles/nclimate1546>
- Weigl, M. (2008) Decommissioning of German Nuclear Research Facilities under the Governance of the Federal Ministry of Education and Research - 8059. <http://www.wmsym.org/archives/2008/pdfs/8059.pdf>
- WNTI (2018) Facts & Figures. <https://www.wnti.co.uk/nuclear-transport-facts/facts-figures.aspx>
- World Nuclear Association (2017) Thorium. <http://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>
- World Nuclear Association (2018) Occupational Safety in Uranium Mining. <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/occupational-safety-in-uranium-mining.aspx>
- World Nuclear Association (2022) Nuclear Reactors | Nuclear Power Plant | Nuclear Reactor Technology - World Nuclear Association. <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>

Referenser till kapitel 8

- Ahlén, I., Bach, L., Baagøe, H.J. & Pettersson, J. (2007) Bats and offshore wind turbines studied in southern Scandinavia. Naturvårdsverket Rapport 5571, juli 2007, <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/ovriga-pub/vindval/978-91-620-5571-2.pdf>
- Andersson, M.H., Andersson, S., Ahlsén, J., Andersson, B.L., Hammar, J., Persson, L.K.G., Pihl, J., Sigray, P. & Wikström, A. (2016) A framework for regulating underwater noise during pile driving. A technical Vindval report, ISBN 978-91-620-6775-5, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden.
- Bergman, M. Ubels, S. Duineveld, G & Meesters, E. (2015) Effects of a 5-year trawling ban on the local benthic community in a wind farm in the Dutch coastal zone, ICES Journal of Marine Science 72(3):962–972, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu193>
- Bergström, L., Öhman, M.C., Berkström, C., Isaeus, M., Kautsky, L., Koehler, B., Nyström Sandman, A., Ohlsson, H., Ottvall, R., Schack, H. & Wahlberg M. (2022) Effekter av havsbaserad vindkraft på marint liv. EN syntesrapport om kunskapsläget 2021. Vindval. Naturvårdsverket Rapport 7049. Maj 2022.
- Elmqvist, Å. (2008) Miljöeffekter av vindkraft. Underlag till VindForsks syntesrapport. Vindforsk teknikrapport 4:08. http://space.hgo.se/wpcvi/wp-content/uploads/import/pdf/Kunskapsdatabas%20miljo/Flora%20och%20fauna/Faglar/forskningsresultat/TR4_08_syntesrapport%20miljoeffekter.pdf
- Falkdalen, U., Falkdalen Lindahl, L. & Nygård, T. (2013) Fågelundersökning vid Storuns vindkraftanläggning Jämtland. Vindval, Naturvårdsverket. Rapport 6574, augusti 2013. <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/6500/978-91-620-6574-4.pdf>
- Haapala, K. R. & Prempreeda, P. (2014) Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. Int. J. Sustainable Manufacturing, 3(2): 170-185.
- Hallowell, M. (2013) Ocean wind farms: Challenges on horizon. http://www.sea-keeper.org/?page_id=1298
- Hammar, L. (2014) Power from the Brave New Ocean – Marine Renewable Energy and Ecological Risks. Avhandling. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Helldin, J.O., Jung, J., Neumann, W., Olsson, M., Skarin, A. & Widemo, F. (2012) Vindkraftens effekter på landlevande däggdjur. En syntesrapport. Vindval, Naturvårdsverket Rapport 6499. Juni 2012. <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/6400/978-91-620-6499-0.pdf>
- Hooper, T. Hattam, C. & Austen, M. (2017) Recreational use of offshore wind farms: Experiences and opinions of sea anglers in the UK. Plymouth Marine Laboratory
- Kilfoyle, A.K., Jermain, R.F., Dhanak, M.R., Huston, J.P. & Spieler, R.E. (2017) Effects of EMF Emissions From Undersea Electric Cables on Coral Reef Fish. Nova Southeastern University, Halmos College of Natural Sciences and Oceanography. Dan ia Beach, Florida <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bem.22092>
- Langhamer, O., Haikonen, K. & Sundberg, J. (2009) Wave power – Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14:1329-1335. DOI:10.1016/j.rser.2009.11.016
- Malm, T. (2006) Hur vindkraft påverkar livet på botten – en studie före etablering. Vindval, Naturvårdsverket Rapport 5570, juni 2006. <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/5500/978-91-620-5570-4.pdf>

- Massari, S. & Ruberti, M. (2013) Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, 38(1): 36-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.07.001>.
- Molander, S., Ahlborg, H., Arvidsson, R., Hammar, L., Kushnir, D., Wallin, A. & Westerdahl, J. (2010) Förnybara energikällors inverkan på de svenska miljömålen. Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-6391-7.pdf>
- Öhman, M. C. & Wilhelmsson, D. (2005) VINDREV - Havsbaseade vindkraftverk som artificiella rev: effekter på fisk. Vindforsk, FOI/Energimyndigheten. Rapport. <https://corporate.vattenfall.se/globalassets/sverige/om-vattenfall/om-oss/var-verksamhet/vindkraft/lillgrund/fisklivetkalmarsund.pdf>
- Pavela, C.C., Lacal-Arántegua, R., Marmiera, A., Schülerb, D., Tzimas, E., Buchertb, M., Jenseitb, W. & Blagoevaa, D. (2017) Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy*, 52, ss. 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010>
- Pedersen, E., Forssén, J. & Persson Waye, K. (2010) Human perception of sound from wind turbines. Vindval, Naturvårdsverket. Rapport 6370, June 2010. ISBN 978-91-620-6370-2. <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/ovriga-pub/vindval/978-91-620-6370-2.pdf>
- Sidén, G. (2015) Förnybar Energi. 2. uppl., Lund: Studentlitteratur AB.
- Singh, N.J., Hipkiss, T., Ecke, F. & Hörnfeldt, B. (2017) Betydelsen av kungsörnarnas hemområden, biotopval och rörelser för vindkraftsetablering del 2. Vindval, Naturvårdsverket Rapport 6734, januari 2017.
- Skarin, A., Nellemann, C., Sandström, P., Rönnegård, L. & Lundqvist, H. (2013) Renar och vindkraft. Studier från anläggningen av två vindkraftparker i Malå sameby. Vindval, Naturvårdsverket, Rapport 6564, maj 2013. <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/6500/978-91-620-6564-5.pdf>
- Sprecher, B., Xiao, Y., Walton, A., Speight, J., Harris, R., Kleijn, R., Visser, G. & Kramer, G.J. (2014) Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets. *Environ. Sci. Technol.*, 48(7): 3951–3958. <http://dx.doi.org/10.1021/es404596q>.
- Ström, S. (2014) Samrådsunderlag för Lysekilsprojektet – Forskning och utveckling av vågkraft. Stockholms universitet. Institutionen för naturgeografi och kvartärgeologi/Biogeovetenskap 15hp (Examensarbete grundnivå 2014:BG-43)
- Turner, J. (2017) Mined into extinction: is the world running out of critical minerals? <https://www.mining-technology.com/features/featuremined-into-extinction-is-the-world-running-out-of-critical-minerals-5776166/>
- Venås, C. (2015) Life cycle assessment of electric power generation by wind turbines containing rare earth magnets. Master Thesis, Department of Energy and Process engineering. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Vindval (2016) Vindkraften i samhället: Vindvals lägesrapport 2016. Stockholm: Naturvårdsverket. <http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:921444/FULLTEXT01.pdf>
- Wind Energy - THE FACTS. (uå) Impacts on Marine Mammals and Sea Birds <https://www.wind-energy-the-facts.org/impacts-on-marine-mammals-and-sea-birds.html>
- WWF (2015) WWF: Hälften av havens fiskar och ryggradsdjur har försvunnit. <http://www.wwf.se/press/aktuellt/1603361-wwf-halften-av-havens-fiskar-och-ryggradsdjurhar-forsvunnit>

- Yrkesfiskarna (2010) SFR säger nej till vågkraftspark nordväst om Kungshamn/Smögen. <http://www.yrkesfiskarna.se/medlemsinfo/1538-sfr-vill-inte-ha-vag-kraftsparknordvaest-om-kungshamnsmoegen.html>
- Zhou, B., Li, Z. & Chen, C. (2017) Global potential of rare Earth resources and rare Earth demand from clean technologies. *Minerals*, 7(11): 203. <http://dx.doi.org/10.3390/min7110203>.

Referenser till kapitel 9

- Ali, M.H., Wu B. & Dougal R.A. (2010) An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems. *IEEE Transactions on sustainable energy*, 1(1), pp. 38-47. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2010.2044901>
- Alsema, E. A., de Wild-Sholten, M. J. & Fthenakis, V. M. (2006) Environmental impacts of PV electricity generation – a critical comparison of energy supply options. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Tyskland, 4- 8 September 2006.
- Aman, M. M., Solangi, K.H., Hossain, M.S., Badarudin, A., Jasmon, G.B., Mokhlis, H., Bakar, A.H.A. & Kazi, S.N. (2015) A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 1190-1204.
- Bakhiyi, B., Labrèche, F. & Zayed, J. (2014) The photovoltaic industry on the path to a sustainable future—Environmental and occupational health issues. *Environment international* 73: 224-234.
- Batteriätervinningen (2018) Allt om batterier på fem minuter. <http://www.batteriaterivningen.se/modul/allt-om-batterier-pa-fem-minuter>. <https://www.energinyheter.se/20220705/26828/nordjyllandska-csp-har-utvecklat-en-ny-typ-av-solfangare-tyska-marknaden>
- Björkman, M. (2022) Nordjylländska CSP har utvecklat en ny typ av solfångare för tyska marknaden. *Energinyheter*.
- Boyes, J.D. (1999) Technologies for Energy Storage. Flywheels and Conducting Magnetic Energy Storage, Sandia National Laboratories. Pp. 1548-1550.
- Carvalho, F. P. (2017) Mining industry and sustainable development: time for change. *Food and Energy Security*, 6(2), pp. 61-77.
- Choi, J.-K. & Fthenakis, V. (2010) Design and Optimization of Photovoltaics Recycling Infrastructure. *Environmental Science & Technology*, 01-10, pp. 44-49.
- Davour A., S. Grape, C. Hellesen, A. Håkansson, M. Lantz, J. Ottosson, S. Pomp, S. Qvist, M. Höök (2014) Svensk elförsörjning i framtiden – en fråga med globala dimensioner. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:752144/FULLTEXT01.pdf>
- De Clercq, D. (2018) Europe's first solar panel recycling plant opens in France. Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-solar-recycling/europes-first-solar-panel-recycling-plant-opens-in-france-idUSKBN1JL28Z>.
- Ecoinvent (2018) (Ecoinvent). <https://www.ecoinvent.org/>
- Ekberg, C. & Petranikova, M., (2018) Recycling of spent batteries. <https://www.iva.se/globalassets/presentationer-fran-seminarier/ekberg--iva-20180112---framtidens-batterier-id-114812.pdf>.
- Elliman, R., Gould, C. & Al-Tai, M. (2015) Review of Current and Future Electrical Energy Storage Devices, 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2015, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339795>
- Elways (2017) Teknik för matning. <http://elways.se/teknik-for-matning/>.

- EU (2012) Directive of the European parliament and of the council on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal of the European Union, pp. 38-71.
- GreenMatch (2017) The Opportunities of Solar Panel Recycling: What Happens to PV Panels When Their Life Cycle Ends. <https://www.green-match.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling>.
- IEA (2016) PVPS annual report 2016. International Energy Agency
- Lindgårde, K. (2013) Lunds universitet. <https://lup.lub.lu.se/search/publication/467363>
- McGrail, B.P., Cabe, J.E., Davidson, C.L., Knudsen, F.S., Bacon, D.H., Bearden, M.D., Chamness, M.A., Horner, J.A., Reidel, S.P., Schaefer, H.T., Spane, F.A. & Thorne, P.D. (2013) Techno-economic Performance Evaluation of Compressed Air Energy Storage in the Pacific Northwest. <https://caes.pnnl.gov/pdf/PNNL-22235.pdf>
- Nam, Y. (2013) Solar thermophotovoltaic energy conversion systems with two-dimensional tantalum photonic crystal absorbers and emitters, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; Kyung Hee University, Yongin, South Korea.
- Naturskyddsföreningen (2021) Hur fungerar vätgas? Faktabladd, Naturskyddsföreningen. <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktabladd/hur-fungerar-vatgas/>
- Naturvårdsverket (2017) Tungmetaller i skog. <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Miljoovervakning/Bedomningsgrunder/Skogslandskap/Tungmetaller/>.
- Naturvårdsverket (2018) Batterier. <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Avfall/Producentansvar/Batterier/>.
- Naturvårdsverket (2018) Fakta om Bly. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Manniska/Miljogifter/Metaller/Bly-Pb/>.
- Naturvårdsverket (2018) Fakta om kvicksilver. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Manniska/Miljogifter/Metaller/Kvicksilver-hg/>.
- Naturvårdsverket (2018) Miljömålen 2018. Årlig uppföljning av Sveriges nationella miljömål – med fokus på statliga insatser. Naturvårdsverket, Rapport 6833, Maj 2018. <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/6800/978-91-620-6833-2.pdf>.
- Naturvårdsverket (uå) Fakta om kadmium och kadmiumföreningar. <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/miljoforeningar/metaller/fakta-om-kadmium-och-kadmiumforeningar/>.
- Nohrstedt, L. (2017) De siktar på världsrekord i verkningsgrad. NyTeknik. <https://www.nyteknik.se/energi/de-siktar-pa-varldsrekord-i-verkningsgrad-6880608#:~:text=M%C3%A5let%20%C3%A4r%20att%20n%C3%A5%20en,det%20%C3%A4r%20ett%20v%C3%A4rldsrekord%20d%C3%A5>.
- Nordling A., Englund, R., Hembjer, A. & Mannberg, A. (2015) Energilagring, teknik för lagring av el. IVA, Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien. <https://www.iva.se/globalassets/info-trycksaker/vagval-el/vagval-el-lagring.pdf>.
- Olsson, O. (2013) Vinnova. Elektriska vägar omvärldsbevakning. Vinnova.
- Persson, A. (2017) Karolinska Institutet. <https://ki.se/imm/kadmium-0>
- Peters, I.M., Liu, H., Reindl, T. & Buonassisi, T. (2017) Global Prediction of Photovoltaic Field Performance Differences - A Study Using Open-Source Satellite Data. Joule 2(2): 307-322. [http://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(17\)30183-6](http://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(17)30183-6).
- Pihl, E., Kushnir, D., Sandé, B. & Johnsson, F. (2012) Material constraints for concentrating solar thermal power, Göteborg: Division of Energy Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

- PV CYCLE (2016) Breakthrough in PV module recycling. 18 februari.
<http://www.pvcycle.org/press/breakthrough-in-pv-module-recycling/>
- PV CYCLE (2018) Solar Waste. www.solarwaste.eu.
- Regeringen (2015) Sveriges arbete med de globala målen och Agenda 2030.
<https://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/globala-mal-for-hallbar-utveckling/>
- Riksrevisionen (2011) Botniabanan och järnvägen längs Norrlandskusten. Stockholm: Riksrevisionens Publikationsservice (2011:22).
- Rittmar von Helmolt, R. & Eberle, U. (2007) Fuel cell vehicles: Status 2007. *Journal of Power Sources*, pp. 834-843.
- Rodríguez, L. (2021) Renewable technologies and their geographical location: Why it matters. *Rated Power*. Blog. <https://ratedpower.com/blog/location-renewable-technology/>
- SGU (2016a) Gallium. Sveriges Geologiska Undersökning. <https://www.sgu.se/mineralnaring/kritiska-material/gallium/>
- SGU (2016b) Indium, Sveriges Geologiska Undersökning. <https://www.sgu.se/mineralnaring/kritiska-material/indium/>
- SGU (2020) Erosion. Sveriges Geologiska Undersökning. <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/erosion-och-igenvaxning/erosion>
- Sherwani, A.F., Usmani, J.A. & Varun (2010) Life Cycle Assessment of Solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 540-544. ISSN 1364-0321.
- Sidén, G. (2015) *Förnybar Energi*. Lund: Studentlitteratur AB
- The World Bank, Solar resource data: Solargis (2017) Global horizontal radiation.
<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N. och Gekas, V. (2005) Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33, 289-296. ISSN 0301-4215.
- U.S. Geological Survey (2017) Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey.
- Wall, G (1997). *Naturliga fysiska resurser och livskraftiga energisystem*.
<http://www.exergy.se/ftp/nfr.pdf>.
- Wängberg, I. (2014) Kadmium reser med Lufttransport. *Gifter och miljö 2014*. Naturvårdsverket.
- Weckend, S., Wade, A. & Heath, G. (2016) End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels. IRENA & IEA-PVPS.
- WSP (2013) Elektrifierade vägar för tunga godstransporter: underlag till färdplan. Stockholm: WSP.
- Wu, Z., Hou, A., Chang, C., Huang, X., Shi, D. & Wang, Z. (2014) Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. *Environ Sci Process Impacts*. 16(10): 2432-2441. <https://doi.org/10.1039/c4em00235k>