

Morten Fagerli

# Global oppvarmings påvirkning på transportmekanismer i atmosfæren av PCB og kvikksølv til Arktis

Bacheloroppgave i Kjemi  
Veileder: Øyvind Mikkelsen  
April 2023



Morten Fagerli

# **Global oppvarmings påvirkning på transportmekanismer i atmosfæren av PCB og kvikksølv til Arktis**

Bacheloroppgave i Kjemi  
Veileder: Øyvind Mikkelsen  
April 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for naturvitenskap  
Institutt for kjemi



Kunnskap for en bedre verden



## Abstract

Global warming is leading to warmer temperatures, especially in the Arctic. Extreme weather and even colder temperatures are also consequences of global warming. The rise in temperature cause volatile PBTs to evaporate easier, and its ability to be transported in the atmosphere increases. More extreme weather can cause increased quantities of precipitation, that can lead to increased wet deposition. Colder temperatures can lead to increased use of combustion of organic fuels to heat homes, which can lead to increased amounts of aerosols in the atmosphere. Additionally, global warming will lead to several other environmental consequences that can lead to more release of PBT, or PBT can react and become more toxic, more volatile, or its ability to accumulate in the Arctic will increase.

## Sammendrag

Global oppvarming fører til økte temperaturer på kloden, spesielt i Arktis. Det blir i tillegg mer ekstremvær, og enkelte plasser kan det oppleves at det blir kaldere. Varmere temperaturer fører til at flyktige PBTER lettere kan fordampe, og transporteres i atmosfæren til Arktis. Mer ekstremvær fører til økte nedbørsmengder som øker våtavsetningen. Kaldere temperaturer kan føre til at det blir mer forbrenning av organisk brensel, som kan føre til økte mengder aerosoler i atmosfæren, som kan øke mengden transport. I tillegg fører global oppvarming til en rekke andre miljøkonsekvenser som gjør at PBTER enten slippes ut i større grad, reagerer og blir farligere eller fordamper lettere, eller akkumulerer i Arktis i større grad enn før.

# Innholdsfortegnelse

<b>Abstract</b> .....	<b>i</b>
<b>Sammen drag</b> .....	<b>i</b>
<b>Introduksjon</b> .....	<b>1</b>
<b>Teori</b> .....	<b>1</b>
<b>PBT</b> .....	<b>1</b>
<b>Kvikksølv</b> .....	<b>3</b>
<b>Global oppvarming</b> .....	<b>4</b>
<b>Langdistanse atmosfærisk transport (LRAT)</b> .....	<b>5</b>
<b>Atmosfærisk bevegelsesmodell</b> .....	<b>6</b>
<b>Diskusjon</b> .....	<b>6</b>
<b>Konklusjon</b> .....	<b>9</b>
<b>Referanser</b> .....	<b>10</b>

## Introduksjon

Den gjennomsnittlige temperaturen på jordkloden har økt raskt de siste årene. Siden 1800-tallet har bruken av olje, kull og gass økt, som har ført til at utslippet av klimagasser har økt. Dette har ført til at temperaturen har økt med 1°C siden 1880, og enkelte plasser i Arktis har det økt enda mer (Dahlman, 2023), (Førland et al., 2011). Konsekvensene av dette er mye mer enn økte temperaturer og ismelting. Mange av de naturlige lagrene for mange stoffer kan endres slik at de på nytt slippes ut i naturen og kan transporteres andre steder. Spesielt bioakkumulerende stoffer kan transporteres til områder som Arktis og kan bli værende der, og hvis de i tillegg er giftige, så kan de skade dyr og planteliv. Flyktige PBTer er de som kan transporteres via atmosfæren over store distanser. Kvikksølv er et element i PBT gruppen som kan transporteres både i gassform og på aerosoler. Polyklorerte bifenyler (PCB) er også et slikt stoff, og både PCB og kvikksølv er stoffer som kan være skadelig for økosystemer og mennesker (Zahir et al., 2005) (Boening, 2000) (Ross, 2004). Global oppvarming kan føre til at begge disse transportene øker, i tillegg kan økte temperaturer føre til at våtavsetning skjer i større grad.

Hvordan påvirker global oppvarming PBTers langdistanse transport i atmosfæren, og hvordan endres mønstrene disse har på vei til Arktis på grunn av oppvarmingen? I denne oppgaven blir det sett på sammenhengen mellom global oppvarming og klimaendringer, og langdistanse atmosfærisk transport av persistente, bioakkumulerende og giftige stoffer (PBT). Polyklorerte bifenyler (PCB) og kvikksølv er to PBTer som blir brukt som eksempler i denne oppgaven, på grunn av at de representere både organiske og uorganiske flyktige PBTer. Først blir PBT forklart, og det blir nevnt hvilke stoffer som kan være PBT. Egenskaper og kilder til PCB og kvikksølv blir gjort rede for. Deretter blir teorien for langdistanse atmosfærisk transport, og dens mekanismer gått gjennom, og teori for global oppvarming blir sett på. Med bakgrunn av teorien bak disse punktene blir det diskutert mulige påvirkninger og årsaker global oppvarming kan ha på transport og akkumulering av PBTer i Arktis

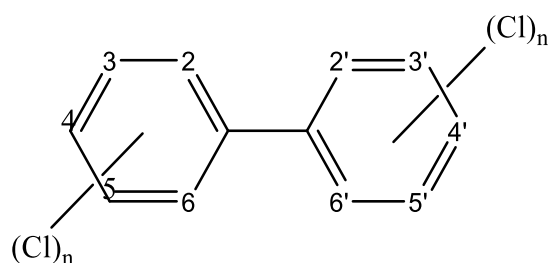
## Teori

PBT

Persistente, bioakkumulerende og giftige stoffer (PBT) er stoffer som har de nevnte egenskapene. Disse degraderes vanskelig i naturen (Holoubek, 1999). Dette kan for eksempel være tungmetaller eller POP (Persistente organiske molekyler). POP er en gruppe organiske molekyler som i høy grad ikke degraderes naturlig. POP er menneskeskapte forbindelser som kan transporteres flere tusen kilometer fra kilden, på grunn av volatiliteten til forbindelsene (Nadal et al., 2015). POP er semivolatile og volatile, som vil si at de har et høyt damptrykk som

fører til at de fordampes lettere. De fleste POPer er volatile nok til at de kan fordampe ("Peer Reviewed: Tracking the Distribution of Persistent Organic Pollutants," 1996). Ifølge Weschler, C, et al. (Weschler & Nazaroff, 2008) er semivolatile organiske forbindelser definert med et damptrykk fra  $10^{-14}$ - $10^{-4}$  atm. Stockholm konvensjonen om persistente organiske forurensninger har en liste av POP som krever stans av produksjon og bruk. Disse stoffene inkluderer blant annet polyklorerte bifenyler (PCB), Polyklorerte dibenzodioxiner (PCDD), dibenzofuran (FS), og organoklorid pesticider (Nadal et al., 2015). POP kan samles i matkilder både på land og i vann, som kan føre til negative helseeffekter for mennesker og dyr. Konsekvensene av eksponering for POP kan være forgiftning, kreft, mutasjoner, og hormonforstyrrelser (Nadal et al., 2015).

PCB er en gruppe POP som består av karbon, hydrogen og klor, som vist i figur 1. Bruken av PCB har vært forbudt i de fleste land siden 1980-tallet (La Rocca & Mantovani, 2006). Likevel er det enda utslipp av PCB på grunn av den tidligere bruken i industrien. Noen kilder til PCB er elektriske komponenter, plastikk, olje og maling. På grunn av at PCB ikke brytes ned i naturen så vil de kunne transporteres gjentatte ganger over lange distanser uten å bli brutt ned. PCB har vist seg å kunne skade dyreliv og mennesker, både kreft og andre helseeffekter kan forekomme. Mennesker får hovedsakelig i seg PCB gjennom mat (Hens & Hens, 2018).



Figur 1: PCB molekylet. Kloratomene kan binde seg til 10 forskjellige plasser (Hens & Hens, 2018)

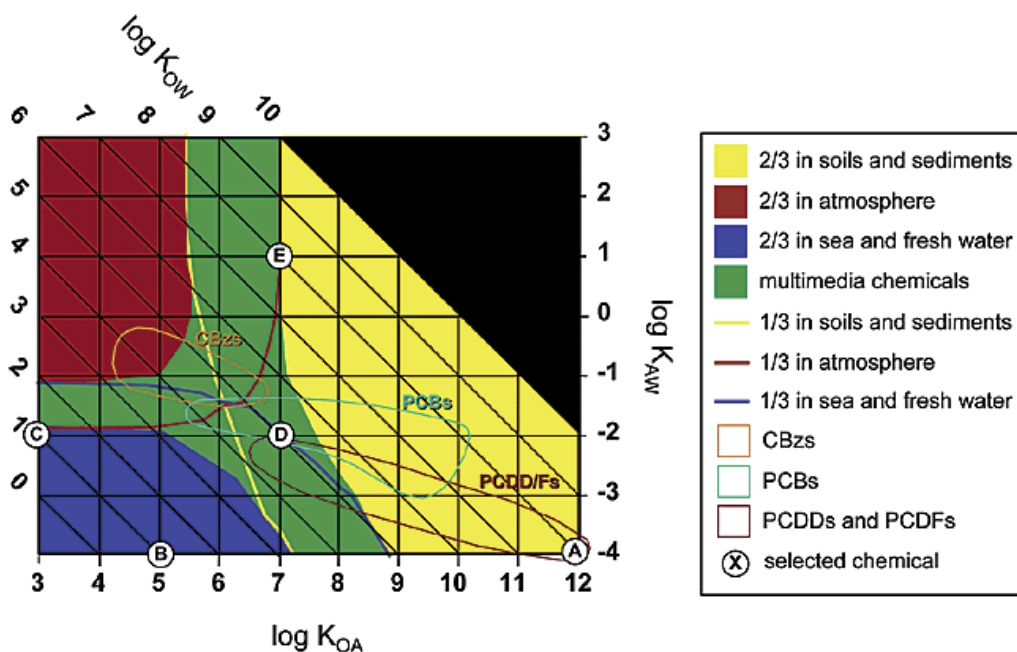
Octanol-luft fordelingskoeffisienten ( $K_{OA}$ ) kan brukes til å forutse fordelingen av organiske stoffer mellom luft, og bakken og aerosoler.  $K_{OA}$  er forholdet mellom konsentrasjonen i octanol, og konsentrasjon i luft, under likevekt. Octanol-vann fordelingskoeffisienten ( $K_{OW}$ ) brukes til det samme som  $K_{OA}$ , men med vann istedenfor luft. Ved hjelp av ligning (3-1) kan  $K_{OA}$  finnes ved å bruke  $K_{OW}$  og Henrys lov (Meylan & Howard, 2005).

$$K_{OA} = \frac{K_{OW}(RT)}{H} \quad (3 - 1)$$



Tabell 1:  $K_{ow}$ ,  $K_{OA}$  og damptrykk gitt for et utvalg PCBer, og damptrykk for kvikksølv. (Li et al., 2003), (Hicks, 2004), (Mills Iii et al., 2007)

	log $K_{ow}$ (25°C)	log $K_{OA}$ (25°C)	Damptrykk i Pascal (log $P_L$ ) (25°C)
PCB – 3 (4)	4,65	6,78	-0,32
PCB – 8 (2, 4')	5,12	7,34	-0,83
PCB – 15 (4, 4')	5,36	7,85	-1,24
PCB – 28 (2, 4, 4')	5,66	7,85	-1,57
PCB – 29 (2, 4, 5)	5,60	7,78	-1,34
PCB – 31 (2, 4', 5)	5,78	7,94	-1,59
PCB – 52 (2, 2', 5, 5')	5,91	8,22	-1,92
PCB – 61 (2, 3, 4, 5)	6,11	8,55	-2,16
PCB – 101 (2, 2', 4, 5, 5')	6,33	8,73	-2,61
PCB – 105 (2, 3, 3', 4, 4')	6,82	9,53	-2,99
PCB - 118 (2, 3', 4, 4', 5-)	6,69	9,36	-3,00
PCB - 138 (2, 2', 3, 4, 4', 5'-)	7,22	9,66	-3,35
PCB - 153 (2, 2', 4, 4', 5, 5'-)	6,87	9,44	-3,22
PCB - 180 (2, 2', 3, 4, 4', 5, 5'-)	7,16	10,16	-3,97
Kvikksølv (Hg)	N/A	N/A	-0.58



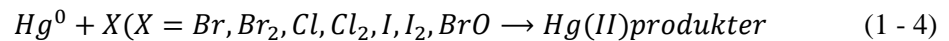
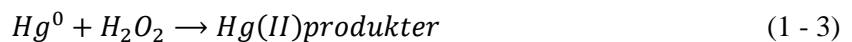
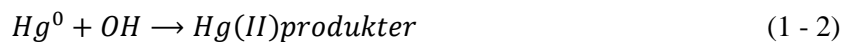
Figur 2: Sammenhengen mellom log  $K_{ow}$ , log  $K_{OA}$ , og log  $K_{AW}$ . Denne modellen er basert 10 år jevn utslipp av hypotetiske persistente stoffer i luft, vann og jord. Gjentatt med tillatelse fra (Wania, 2003). Copyright 2023 American Chemical Society

### Kvikksølv

Kvikksølv er et tungmetall, og er det eneste metallet som er flytende ved romtemperatur og normalt trykk. Kvikksølv er giftige for mennesker, men noen former er mer giftige enn andre (Gonzalez-Raymat et al., 2017). Kvikksølv i miljøet forekommer både naturlig i jordskorpen med en konsentrasjon på  $80\mu\text{g kg}^{-1}$ , men også fra industrielle prosesser (Gonzalez-Raymat et

al., 2017). På grunn av industrien og andre menneskeskapte aktiviteter så slippes det mer tungmetaller i naturen enn det som er naturlig. Også plasser der kvikksølv ikke forekommer i særlig stor grad, vil bruk av fossilt drivstoff eller andre kilder føre til økte konsentrasjoner. Kvikksølv havner i naturen på to forskjellige måter. Den ene er naturlig, og kommer fra vulkanutbrudd, jord, skogbranner og korrosjon av stein, eller ved fordamping av sjøvann. Den andre måten fra menneskeskapte mekanismer, slik som forbrenning av fossilt drivstoff (WHO, 2017).

Kvikksølv i Arktis er annerledes enn ved sørligere breddegrader, på grunn av de store forskjellene i miljøet. Dette kan observeres ved å se på konsentrasjonene av oksidantene av kvikksølv ( $O_3$ , OH,  $H_2O_2$ , og halogener). Over Arktis er konsentrasjonen av disse redusert.  $O_3$  er redusert med en faktor på 4, OH med en faktor på 10, og  $H_2O_2$  med en faktor på 8 (Nguyen et al., 2009). Reaksjonsligningene mellom kvikksølv og oksidantene er vist i ligning 1-1 til 1-4. (Nguyen et al., 2009)



### Global oppvarming

Global oppvarming er når temperaturen på jordas overflate øker på grunn av menneskelige aktiviteter (Houghton, 2005). Oppvarmingen skjer blant annet på grunn av at konsentrasjonen av klimagasser øker, og disse øker effekten til drivhuseffekten. Klimagassene er karbondioksid, metan, dinitrogenoksid, og klorfluorkarbon, og vanndamp (Houghton, 2005).

Drivhuseffekten fungerer på samme måte som et drivhus, ved at glasset i drivhuset fanger energien fra sola inne i drivhuset. Klimagassene i atmosfæren fungerer som glassene i et drivhus. Omtrent halvparten av solstrålene som treffer jordklodens overflate blir absorbert, og varmer planeten. Resten av solstrålene blir enten reflektert av atmosfæren eller overflaten, slik at de ikke gir varme. Solstrålene som treffer jordkloden blir omgjort til infrarød stråling, og de infrarøde strålingene blir reflektert tilbake til jordoverflaten og nedre del av atmosfæren, på grunn av klimagassene og skyer. På grunn av dette har jordkloden en temperatur som gjør den

levelig. Når konsentrasjonen av disse klimagassene øker, vil også mengden infrarød stråling som reflekteres tilbake øke, som fører til at gjennomsnittstemperaturen øker (Houghton, 2005).

Langdistanse atmosfærisk transport (LRAT)

Langdistanse transport i atmosfæren (LRAT) er transport av forurensninger, enten ved at de transporteres i gassform, eller som aerosoler. Stoffene vil kunne transporteres flere tusen kilometer fra kilden ("Peer Reviewed: Tracking the Distribution of Persistent Organic Pollutants," 1996). Global destillasjon og gresshoppereffekten er varianter av langdistanse transport i atmosfæren. Når volatile og semivolatile stoffer er i et miljø hvor det er varmt nok slik at de fordampes, vil de kunne enten feste seg til andre partikler, eller bli fraktet i gassform i atmosfæren. Når stoffene er festet i partikler så kan disse aerosolene være lette nok til at de kan fraktes med luftstrømmene i atmosfæren, helt til forholdene tilsier at avsetning skjer. Disse partiklene, også kalt svevestøv stammer fra en rekke kilder, hvor forbrenningsprosesser, vedfyring, og veitrafikk er noen av de viktigste kildene. Økte mengder svevestøv fører til at de volatile stoffene lettere kan transporteres via atmosfæren. Svevestøvet i atmosfæren blir så avsatt tilbake til bakken enten ved tør avsetning eller våtavsetning.

Våt avsetning kan bare skje ved nedbør, ved at det fanger forurensningene, og tar dem med ned til jordoverflaten. Våt avsetning kan skje både i skyer, men også under skyer. Våt avsetning kan beregnes etter formel 1-1, hvor nedbør koeffisienten har enhet  $s^{-1}$ . A og B er konstanter som er spesifikk for gassene eller aerosolene, og P er nedbørsraten. Dette er bare en av mange ulike modeller som beskriver våt avsetning.

$$k_w = AP^B \quad (2 - 1)$$

Tørr avsetning skjer hele tiden ved at det er utskifting av gasser mellom atmosfæren og jordoverflaten. For aerosoler så skjer det når partiklene er så store at gravitasjonen fører til at de avsettes (Leelossy et al., 2014).

Global destillasjon fungerer veldig likt som vanlig destillasjon, for eksempel destillasjon av etanol. I global destillasjon så er det volatiliteten til stoffene som bestemmer hvor enkelt eller hvor langt de transporteres. Prosessen fungerer ved at ved sørligere breddegrader så vil et stoff slik som kvikksølv og PCB kunne gå til gassform og blandes inn i atmosfæren, og deretter føres med vindsystemene bort fra kilden. Når temperaturen synker, gjerne ved polene så vil disse stoffene felles ut og legge seg på jordoverflaten. Vindsystemene på jordkloden gjør at vind fra ekvator etter hvert beveger seg mot Arktis, slik at det er gode forhold for at global destillasjon skjer (*HEMISPHERIC PREVAILING WINDS*). Varmere klima fører til mer fordampning enn

avsetning, og kaldere klima ved høyere breddegrader har større grad av avsetning enn fordamping av disse stoffene (Wania & Mackay, 1996). I noen tilfeller så vil disse stoffene bevege seg små etapper omgangen ved at de fordamper, deretter avsettes, og fordamper igjen flere ganger, helt til de kommer til den breddegraden hvor det er kaldt nok til at slutter å fordampe. Dette kalles gresshopper effekten (Wania & Mackay, 1996).

#### Atmosfærisk bevegelsesmodell

En av de mest brukte modellene for å forutsi bevegelser av luftmasser i atmosfæren er HYSPLIT (The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model). Denne modellen er utviklet av Air Resources Laboratory tilhørende NOAA (Stein et al., 2015). Modellen kan brukes til flere forskjellige modelleringer av luftmasser, og den kan brukes til å gå tilbake i tid for å finne kilden til forskjellige forurensninger. Man kan da spore mulige kilder til enkelte stoffer, ved å simulere deres mulige baner i atmosfæren. HYSPLIT kan også brukes til å modellere fordeling og avsetning av stoffer i atmosfæren. HYSPLIT er en hybrid mellom Lagrangian metoden og Eulerian metoden. Lagrangian metoden bruker et bevegende rutenett som viser bevegelsene til de spesifikke luftmassene. Eulerian metoden bruker man et fastsatt rutenett som istedenfor å følge luftmassene, ser på konsentrasjonene som beveger seg forbi (Stein et al., 2015).

## Diskusjon

Global oppvarming øker den gjennomsnittlige temperaturen på jordkloden. I motsetning til hva som kanskje gir mening, så kan dette føre til kaldere vintere. Dette er ifølge Francis et al. (Francis & Vavrus, 2012) et fenomen kalt Arctic Amplification, der Arktis varmes opp dobbelt så raskt som resten av kloden. En kald vinter ved midtre lengdegrad kan være problematisk med tanke på PBTer. Avhengig av hvor kilden er, så vil det kunne avsettes større konsentrasjoner i disse områdene enn det har blitt gjort tidligere, på grunn av områdets evne til å avsett stoffene. Samtidig kan større konsentrasjoner av flyktige PBTer transporteres mot Arktis, fordi kildene til PBTene, og aerosoler øker, eller kommer nærmere. På grunn av global destillasjon kan de mer volatile stoffene som vanligvis ikke har kunnet kondensert ved de sørlige og midtre breddegradene, oppleve nå kalde nok temperaturer til at de avsettes. Det er som regel ved disse Breddegradene det er bosatt mennesker, og de kan da oppleve større konsentrasjoner av PBT, og de mange negative helseeffektene PBT kan ha (Wania, 2003). Sammen med gresshoppereffekten kan forurensningene transporteres mellom Arktis og sørligere breddegrader gjennom året, slik at begge områder opplever økte konsentrasjoner til forskjellige årstider.

Når Arktis varmes opp dobbelt så raskt som resten av kloden, så kan dette til slutt føre til at Arktis ikke lenger blir siste stoppested for mange av PBTene. Økte temperaturer fører til at der stoffene før ikke har kunnet fordampe, nå fordamper og transporteres videre i atmosfæren. Mer fordamping av flyktige PBTer gjør at Arktis vil få minket konsentrasjon av stoffene, som vil være positivt for befolkning, og det sårbare dyrelivet som lever der. En av de negative konsekvensene er at Arktis ikke lenger fanger disse stoffene og lagrer de, og andre områder på kloden vil kunne oppleve høyere konsentrasjoner. Dette kan enten være øde områder uten mennesker og dyr, eller tett befolkede områder eller sårbare naturområder (Gouin & Wania, 2007). I tillegg så vil ikke Arktis miste all PBT, men gresshopper effekten vil kunne skje i enda større grad, ved at på sommeren så forsvinner en del volatile PBT fra Arktis, og om vinteren så vil konsentrasjonen øke igjen.

Arctic Amplification fører som sagt til kaldere vintere. Dette fører da til at husstander fyrer mer i peis og ovner, og forbrenning av søppel eller annet brensel øker. Ifølge Meng et al. (Meng et al., 2019) så øker konsentrasjonene av svevestøv på vinteren. I tillegg viser deres undersøkelser at det er betraktelig større økning av de mindre partiklene enn de større (Meng et al., 2019). Det er mulig at denne økningen av svevestøv øker transport av volatile PBTer i atmosfæren på grunn av at PBT fester seg til partiklene i svevestøvet. I tillegg så er det de minste partiklene som transporters lengst. Derfor kan denne økningen av svevestøv føre til at det blir en økning av transport av aerosoler mot Arktis, som tar med seg PBTer. Ved hjelp av tabell 1 kan man bruke fordelings- koeffisientene til å forutsi hvilke stoffer som fester seg til et fast stoff slik som aerosoler.

I atmosfæren så skjer det også en rekke reaksjoner som kan enten endre flyktigheten til kvikksølv PCB, eller endre andre kjemiske egenskaper som gjør de enten mer giftig, mindre giftig, eller de brytes ned til andre mindre farligere stoffer. OH radikalet kan reagere med PCB og er den reaksjonen som står for den største andelen av reaksjoner som fjerner PCB fra atmosfæren (Anderson & Hites, 1996). Kvikksølv kan også gjennomgå reaksjoner i atmosfæren. Atmosfærisk kvikksølv er hovedsakelig uorganiske former for kvikksølv,  $Hg^0$  og  $[Hg(II)]$ , samt andre former for kvikksølv (Lin & Pehkonen, 1999).  $Hg^0$  er den vanligste formen i atmosfæren, og er også den formen som har lengst levetid i atmosfæren, og det er foreslått at  $O_3$  og  $Cl_2$  er viktige oksidanter for  $Hg^0$  (Lin & Pehkonen, 1999).

Når den gjennomsnittlige temperaturen øker på grunn av global oppvarming, så fører det til mer vanndamp er i atmosfæren. Denne vanndampen kan være med på å øke hastigheten og mengden våt avsetning som skjer. Ifølge Trenberth (Trenberth, 2011) så øker kapasiteten for atmosfæren

til å holde på vann med 7% per grad Celsius økning i temperatur. De varmere temperaturene kan også føre til mer ekstremvær som stormer, lyn og torden, og tropisk sykloner. Dette gjør at det i perioder kan være økt tørke med lite våtavsetning i enkelte områder, og perioder med ekstreme mengder nedbør. Disse økte nedbørsmengdene kan være med på å øke våtavsetningen som skjer. Kombinert med mulige økte konsentrasjoner av aerosoler, så kan dette føre til at enkelte områder, også Arktis får mer avsetning av PBTer. Med tanke på hva dette gjør med konsentrasjonen av PBT i disse områdene, så må det undersøkes nærmere i andre prosjekter, men det kan argumenteres for at man kan få perioder med økte konsentrasjoner på grunn av den økte evnen til våt avsetning. Men det er også mulig at det ikke blir noen endring, på grunn av at tørr avsetningen motvirker denne balansen. Altså at i perioder med lite våt avsetning, så øker tørravsetningen, men ved tørrere perioder så er det som oftest varmere, så det er naturlig å tenke at avsetningen minker i enkelte perioder. For kvikksølv så kan perioder med tørke og perioder med mye nedbør ha stor påvirkning på hvor mye som avsettes. Hg<sup>0</sup> er den formen av atmosfærisk kvikksølv som forekommer i størst grad (>90%), og er i gassfase (Lin & Pehkonen, 1999). Dette kan gjøre at ved gunstige forhold så kan tørravsetning øke, og den største forekomsten av kvikksølv i atmosfæren kan avsettes. Hg(II) er oftest til stede i atmosfærisk vann, og vil da avsettes når det er mye nedbør til stede, når forholdene for våtavsetning er gunstig (Lin & Pehkonen, 1999).

En annen måte ekstremvær og økte nedbørsmengder kan øke konsentrasjoner av PBT er at kilder, naturlige eller menneskeskapt, blir ødelagt av været slik at disse stoffene slippes ut i naturen. Mye PCB og kvikksølv er lagret enten i søppeldeponier eller andre steder som anses som permanente lagringsplasser. Med økt ekstremvær så øker også sannsynligheten for at det skjer en naturkatastrofe som kan ødelegge disse lagringsplassene. Dette kan enten være oversvømmelse som transporterer stoffene til en annen plass det de kan fordampe til atmosfæren, eller en annen type ødeleggelse som gjør at stoffene slippes ut. Slike uønskede utslipp kan også forekomme fra naturlige kilder til kvikksølv, med at forvitring av jordskorpen øker, eller at naturkatastrofer slik som vulkanutbrudd skjer hyppigere.

Forskjellige stoffer har forskjellig volatilitet, som gjør at de forskjellige stoffene vil avsettes ved forskjellige breddegrader. De med lavere volatilitet avsettes ved varmere temperaturer enn et stoff med veldig høy volatilitet. Dette kan sammenlignes med gasskromatografi, hvor man kan skille volatile stoffer (Wania & Mackay, 1996). Dette gjør det mulig å anslå hvor langt nord eller sør et stoff vil transporteres, basert på damptrykket til de enkelte stoffene. I tabell 1 kan man se den relative forskjellen mellom damptrykket til forskjellige PCBer og for kvikksølv. Et

stoff som enkelt fordamper, slikt som kvikksølv og enkelte PCBer, kan transporters lengere mot Arktis eller helt til Arktis, fordi de ikke avsettes ved de gradvis kaldere temperaturene. De vil også fordampe lettere når de først er avsatt i Arktis, noe som gjør at de har større konsentrasjon i atmosfæren. Dette betyr at de kan forsvinne og komme tilbake til Arktis, ettersom hvordan temperaturene er i lengre perioder. Motsatt så vil stoffene som ikke fordamper like lett bli værende i Arktis hvis de først har kommet dit, og kan deretter akkumulere i planter og dyreliv som er der.

For PCB så har man i tabell 1 oppgitt  $K_{OW}$  og  $K_{OA}$ . Disse sier noe om forholdet mellom stoffets konsentrasjon i octanol, og konsentrasjonen i henholdsvis vann og luft. Ved hjelp av figur 2 kan man visualisere hvor sannsynlig det er at stoff blir i enten atmosfæren eller binder seg på partikler. Høy log  $K_{OA}$  indikerer at stoffet vil være på fast stoff, enten jord eller faste partikler (Wania, 2003). Ved å se på fordelingskoeffisientene kan man forutse hvor et gitt stoff mest sannsynlig er, basert på verdien, og ved hjelp a figur 2 er det lettere å visualisere hvor stoffet befinner seg.

Varmere Arktis fører også til økt vekts av planter og vegetasjon. Dette fører igjen til økte mengde karbonholdig jordsmonn. Elementært kvikksølv i jorden kan omgjøres til andre former for kvikksølv, avhengig av innholdet i jordsmonnet (Renneberg & Dudas, 2001). Eksponering av kvikksølv for mennesker og dyreliv er knyttet sammen med hvor mye metylkvikksølv som er til stede (Driscoll et al., 2013). Dette kan bety at økte mengder kvikksølv i Arktis, sammen med økte mengder planter kan føre til eksponering av metylkvikksølv for menneskene og dyrelivet der. I tillegg så kan kvikksølv akkumulere i røttene til planter, som igjen fører til større potensiale for økt konsentrasjon av kvikksølv i Arktis (Patra & Sharma, 2000). Derfor kan det over tid samles store mengder kvikksølv og andre PBTer i Arktis, fordi både transporten i atmosfæren øker, men også på grunn av at evnen til å akkumulere de også øker.

## Konklusjon

PBT er en gruppe stoffer som vanskelig brytes ned i naturen, kan være bioakkumulerende, og giftige. Enkelte PCBer og kvikksølv betegnes som PBTer, på grunn av egenskapene de har til a akkumulere i naturen, og at de er giftige. I tillegg er de flyktige, som gjør at de kan transporters i atmosfæren over lange distanser, kalt langdistanse atmosfærisk transport. Denne transporten kan enten gå direkte fra kilden og til Arktis, men ofte så skjer gresshoppereffekten, som gjør at stoffene transporteres i flere etapper, ved at de fordampes og avsettes flere ganger, før de til slutt havner i Arktis. Gresshoppereffekten kan også gjøre at stoffene fordampes til atmosfæren

i de varmere årstidene og avsettes ved de kaldere årstidene, i flere etapper, helt til de slutter å fordampe fordi temperaturene ikke blir høye nok.

Desto mer flyktige stoffene er, jo lettere fordamper de og kan transporteres i atmosfæren. Langdistanse atmosfærisk transport gjør at stoffene kan transporters flere tusen kilometer fra kilden enten i gassform, eller på aerosoler. Våt og tørravsetting gjør at de avsettes tilbake på bakken, når temperaturen er lav nok. Damptrykket til stoffene bestemmer hvor lett et stoff fordamper, og kan på den måten avgjøre hvor langt at stoff transporteres.

Noen av de største kildene til enkelte PBter er ved sørlige breddegrader. Der fordamper stoffene lettere, og når de ankommer kaldere områder, slik som Arktis så avsettes de. Hvordan global oppvarming påvirker konsentrasjonen av disse stoffene og hvordan transporten av disse påvirkes, må bli undersøkt nærmere for å fastslå hva som faktisk skjer, men det er sannsynlig at disse transportmekanisme påvirkes.

Global oppvarming fører ikke bare til økt varme, men andre miljøkonsekvenser som mer ekstremvær og økt tørke. Dette kan føre til en rekke miljøkonsekvenser, blant annet at uønskede stoffer slipper ut i miljøet, og transport av disse til mer befolkede, eller sårbare områder.

## Referanser

- Anderson, P. N., & Hites, R. A. (1996). OH Radical Reactions: The Major Removal Pathway for Polychlorinated Biphenyls from the Atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 30(5), 1756-1763. <https://doi.org/10.1021/es950765k>
- Boening, D. W. (2000). Ecological effects, transport, and fate of mercury: a general review. *Chemosphere*, 40(12), 1335-1351. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00283-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00283-0)
- Dahlman, R. L. a. L. (2023). *Climate Change: Global Temperature*. Retrieved 18.01.2023 from <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>
- Francis, J., & Vavrus, S. (2012). Evidence linking arctic amplification to extreme weather in Mid-Latitudes. *Geophysical Research Letters*, 39, L06801. <https://doi.org/10.1029/2012GL051000>
- Førland, E. J., Benestad, R., Hanssen-Bauer, I., Haugen, J. E., & Skaugen, T. E. (2011). Temperature and Precipitation Development at Svalbard 1900–2100. *Advances in Meteorology*, 2011, 893790. <https://doi.org/10.1155/2011/893790>
- Gonzalez-Raymat, H., Liu, G., Liriano, C., Li, Y., Yin, Y., Shi, J., . . . Cai, Y. (2017). Elemental mercury: Its unique properties affect its behavior and fate in the environment. *Environmental Pollution*, 229, 69-86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.101>
- Gouin, T., & Wania, F. (2007). Time Trends of Arctic Contamination in Relation to Emission History and Chemical Persistence and Partitioning Properties. *Environmental Science & Technology*, 41(17), 5986-5992. <https://doi.org/10.1021/es0709730>



- HEMISPHERIC PREVAILING WINDS. The National Weather Service (NWS).  
[https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU\\_Training\\_Page/winds/Wx\\_Terms/Flight\\_Environment.htm](https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/winds/Wx_Terms/Flight_Environment.htm)
- Hens, B., & Hens, L. (2018). Persistent Threats by Persistent Pollutants: Chemical Nature, Concerns and Future Policy Regarding PCBs—What Are We Heading For? *Toxics*, 6(1), 1.
- Hicks, W. T. (2004). Evaluation of Vapor-Pressure Data for Mercury, Lithium, Sodium, and Potassium. *The Journal of Chemical Physics*, 38(8), 1873-1880. <https://doi.org/10.1063/1.1733889>
- Holoubek, I. (1999). Persistent Bioaccumulative and Toxic Chemicals in Central and Eastern Europe: Levels and Risks. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 29(3), 179-185.  
<https://doi.org/10.1080/10408349891199374>
- Houghton, J. (2005). Global warming. *Reports on Progress in Physics*, 68(6), 1343.  
<https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/6/R02>
- La Rocca, C., & Mantovani, A. (2006). From environment to food: the case of PCB. *Annali-Istituto Superiore di Sanita*, 42(4), 410.
- Leelossy, A., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., & Mészáros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Central European Journal of Geosciences*, 6, 257-278. <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0188-6>
- Li, N., Wania, F., Lei, Y., & Daly, G. (2003). A Comprehensive and Critical Compilation, Evaluation, and Selection of Physical-Chemical Property Data for Selected Polychlorinated Biphenyls. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 32. <https://doi.org/10.1063/1.1562632>
- Lin, C.-J., & Pehkonen, S. O. (1999). The chemistry of atmospheric mercury: a review. *Atmospheric Environment*, 33(13), 2067-2079. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00387-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00387-2)
- Meng, X., Wu, Y., Pan, Z., Wang, H., Yin, G., & Zhao, H. (2019). Seasonal Characteristics and Particle-size Distributions of Particulate Air Pollutants in Urumqi. *Int J Environ Res Public Health*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph16030396>
- Meylan, W. M., & Howard, P. H. (2005). Estimating octanol–air partition coefficients with octanol–water partition coefficients and Henry’s law constants. *Chemosphere*, 61(5), 640-644.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.03.029>
- Mills lii, S. A., Thal, D. I., & Barney, J. (2007). A summary of the 209 PCB congener nomenclature. *Chemosphere*, 68(9), 1603-1612.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.03.052>
- Nadal, M., Marquès, M., Mari, M., & Domingo, J. L. (2015). Climate change and environmental concentrations of POPs: A review. *Environmental Research*, 143, 177-185.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.10.012>
- Nguyen, H. T., Kim, K.-H., Shon, Z.-H., & Hong, S. (2009). A Review of Atmospheric Mercury in the Polar Environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(7), 552-584. <https://doi.org/10.1080/10643380701764308>
- Patra, M., & Sharma, A. (2000). Mercury toxicity in plants. *The Botanical Review*, 66(3), 379-422.  
<https://doi.org/10.1007/BF02868923>
- Peer Reviewed: Tracking the Distribution of Persistent Organic Pollutants. (1996). *Environmental Science & Technology*, 30(9), 390A-396A. <https://doi.org/10.1021/es962399q>
- Renneberg, A. J., & Dudas, M. J. (2001). Transformations of elemental mercury to inorganic and organic forms in mercury and hydrocarbon co-contaminated soils. *Chemosphere*, 45(6), 1103-1109. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00122-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00122-9)
- Ross, G. (2004). The public health implications of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 59(3), 275-291.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.003>
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1-2), 123-138.
- Wania, F. (2003). Assessing the Potential of Persistent Organic Chemicals for Long-Range Transport and Accumulation in Polar Regions. *Environmental Science & Technology*, 37(7), 1344-1351. <https://doi.org/10.1021/es026019e>
- Wania, F., & Mackay, D. (1996). The global fractionation of persistent organic pollutants.
- Weschler, C. J., & Nazaroff, W. W. (2008). Semivolatile organic compounds in indoor environments. *Atmospheric Environment*, 42(40), 9018-9040. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.052>
- WHO. (2017). *Mercury and health*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- Zahir, F., Rizwi, S. J., Haq, S. K., & Khan, R. H. (2005). Low dose mercury toxicity and human health. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 20(2), 351-360. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.etap.2005.03.007>

