

## Källfördelning av PCB<sub>7</sub> i Bråviken

- tillämpning av massbalansmodellering för identifiering av åtgärder inom ramen för Vattendirektivet



Uppdragsnummer: 317 342

Datum: 2011-03-25

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                     |                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Uppdragsgivare:<br>Länsstyrelsen Östergötland                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Hifabs uppdragsnummer:<br>317 342                                                                                   | Hifab AB<br>Org. nr. 556125-7881<br>Repslagaregatan 19<br>582 22 Linköping<br><br>Telefon: 013-35 72 70<br>Telefax: 013-35 72 71 |
| Uppdragsgivarens kontaktperson:<br>Maria Carlsson                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                     |                                                                                                                                  |
| Rapporttitel:<br>Källfördelning av PCB <sub>7</sub> i Bråviken<br><br>Tillämpning av massbalansmodellering för<br>identifiering av åtgärder inom ramen för<br>Vattendirektivet                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                     |                                                                                                                                  |
| Sammanfattande slutsatser:<br><br><p>Denna rapport redovisar resultat från projektet ”<i>Källfördelning av miljögifter i Bråviken- en utvärdering av åtgärder för minskad föroreningsbelastning</i>”. Projektet genomfördes mellan augusti 2009 och mars 2011, med medel från Naturvårdsverkets Havsmiljöanslag.</p> <p>Simulering av Bråvikens 0-alternativ visar att sediment utgör den huvudsakliga källan för PCB<sub>7</sub> i de inre delarna. Även Motala Ström ger ett visst bidrag men i jämförelse med sedimenten tycks denna källa inte vara signifikant. I de yttre delarna kommer huvuddelen av PCB<sub>7</sub> från atmosfären samt från bakgrundsbelastningen i Östersjön. Genom påverkan från sediment i de inre delarna predikteras här något förhöjda PCB-halter i vattnet. Störst påverkan på vattnet har sedimenten i Loddbyviken men detta bidrar inte till belastningen i Pampusfjärden. Beräknad återhämtningstid då haltskillnaderna mellan Bråvikens inre och yttre delar har jämnats ut är ca 10-20 år. Analyserade halter i abborre visar att skillnad i exponering föreligger mellan de inre och yttre delarna. Skillnaden motsvarar en faktor 3, vilket motsvarar den predikterade haltskillnaden i vatten mellan de inre och delarna samt uppmätta haltskillnader i ytsediment.</p> <p>Resultaten från massbalansmodelleringen har bidragit till en ökad förståelse för hur olika källor och spridningsmekanismer samverkar i Bråviken. Olika typer av mätdata har kunnat processas på ett sätt som gett en tydligare helhetsbild eftersom modellen ger möjlighet att blicka framåt.</p> <p>Liknande verktyg som det som tillämpats i detta projekt har sin främsta användbarhet i myndigheternas åtgärdsarbete. Dels i tidiga skeden för att identifiera viktiga frågeställningar och göra prioriteringar för fortsatt arbete, men också för direkt utvärdering av olika åtgärdsförslag. Mycket arbete kvarstår dock innan länsstyrelserna har tillgång till ett modellverktyg som är anpassat efter deras behov.</p> |                                                                                                                     |                                                                                                                                  |
| Uppdragsledare:<br>Annika Åberg                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Godkänd av uppdragsledaren:<br> |                                                                                                                                  |
| Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte Hifab AB i förväg skriftligen godkänt annat.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                     |                                                                                                                                  |

## Sammanfattning

Denna rapport redovisar resultat från projektet ”Källfördelning av miljögifter i Bråviken- en utvärdering av åtgärder för minskad föroreningsbelastning”. Projektet genomfördes mellan augusti 2009 och mars 2011, med medel från Naturvårdsverkets Havsmiljöanslag.

Bakgrunden till arbetet som utförts är länsstyrelsen Östergötlands behov att finna effektiva åtgärder som kan bidra till att höja den kemiska och ekologiska statusen i länets vattenförekomster. Projektets primära syfte var att undersöka vilka processer som styr spridningen av föroreningar inom Bråviken för att därigenom kunna identifiera de framtida åtgärder som förväntas vara mest effektiva för att förbättra Bråvikens ekologiska/kemiska status. Som en del i detta avsåg projektet även att undersöka i vilken utsträckning som Bråviken bidrar med belastningen av föroreningar i Östersjön. Ett ytterligare syfte var att introducera ett för länsstyrelsen nytt verktyg som bygger på massbalansmodellering av föroreningar baserat på fugacitetskonceptet.

Simulering av Bråvikens 0-alternativ visar att sediment utgör den huvudsakliga källan för PCB<sub>7</sub> i de inre delarna. Även Motala Ström ger ett visst bidrag men i jämförelse med sedimenten tycks denna källa inte vara signifikant. I de yttre delarna kommer huvuddelen av PCB<sub>7</sub> från atmosfären samt från bakgrundsbelastningen i Östersjön. Genom påverkan från sediment i de inre delarna predikteras här något förhöjda PCB-halter i vattnet. Störst påverkan på vattnet har sedimenten i Loddbyviken men detta bidrar inte till belastningen i Pampusfjärden. Beräknad återhämtningstid då haltskillnaderna mellan Bråvikens inre och yttre delar har jämnats ut är ca 10-20 år. Analyserade halter i abborre visar att skillnad i exponering föreligger mellan de inre och yttre delarna. Skillnaden motsvarar en faktor 3, vilket motsvarar den predikterade haltskillnaden i vatten mellan de inre och delarna samt uppmätta haltskillnader i ytsediment.

Modellens resultat har bedömts som rimliga vid jämförelser med olika typer av empiriska data. Osäkerheter i resultaten föreligger dock, bl.a. på grund av bristande kunskap om sedimentationsdynamiken i systemet.

Resultaten från massbalansmodelleringen har bidragit till en ökad förståelse för hur olika källor och spridningsmekanismer samverkar i Bråviken. Olika typer av mätdata har kunnat processas på ett sätt som gett en tydligare helhetsbild eftersom modellen ger möjlighet att blicka framåt. Modellens främsta funktion är således att kunna testa utfallet av olika hypoteser. Då både mätdata och simuleringsresultat bearbetas samtidigt väcks nya frågeställningar kring vilka kunskapsluckor som kvarstår och områden där mer information kan behöva inhämtas är lättare att identifiera jämfört med om man bara utgår från mätdata. Specifika åtgärder för Bråviken har dock fortfarande inte identifierats för PCB, bl.a. för att föroreningssituationen är diffus och täcker stora ytor.

Liknande verktyg som det som tillämpats i detta projekt har sin främsta användbarhet i myndigheternas åtgärdsarbete. Dels i tidiga skeden för att identifiera viktiga frågeställningar och göra prioriteringar för fortsatt arbete, men också för direkt utvärdering av olika åtgärdsförslag.

## Innehållsförteckning

|          |                                                    |           |
|----------|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INLEDNING.....</b>                              | <b>1</b>  |
| 1.1      | INTRODUKTION .....                                 | 1         |
| 1.2      | BAKGRUND .....                                     | 1         |
| 1.3      | SYFTE.....                                         | 1         |
| <b>2</b> | <b>ARBETSGÅNG.....</b>                             | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>BEGRÄNSNINGAR AV PROJEKTETS OMFATTNING.....</b> | <b>3</b>  |
| <b>4</b> | <b>BESKRIVNING AV BRÅVIKEN .....</b>               | <b>3</b>  |
| 4.1      | FYSISK OCH GEOGRAFISK UTBREDNING.....              | 3         |
| 4.2      | KÄNDA FÖRORENINGSKÄLLOR.....                       | 5         |
| 4.3      | FÖRORENINGSSITUATION .....                         | 5         |
| 4.4      | STATUS ENLIGT VATTENDIREKTIVET.....                | 6         |
| <b>5</b> | <b>BAKGRUND TILL MASSBALANSMODELLERING .....</b>   | <b>6</b>  |
| 5.1      | BOX-PRINCIPEN .....                                | 6         |
| 5.2      | INTRODUKTION AV FÖRORENINGAR .....                 | 7         |
| 5.3      | KOMPLEXITET .....                                  | 7         |
| 5.4      | MASSBALANSMODELLERINGENS FÖR- OCH NACKDELAR.....   | 8         |
| <b>6</b> | <b>PROBLEMFORMULERING BRÅVIKEN.....</b>            | <b>9</b>  |
| 6.1      | ALLMÄNT.....                                       | 9         |
| 6.2      | PROJEKTETS UTGÅNGSPUNKT.....                       | 10        |
| 6.3      | PROBLEMFORMULERING.....                            | 10        |
| <b>7</b> | <b>DATAINSAMLING .....</b>                         | <b>11</b> |
| 7.1      | ALLMÄNT.....                                       | 11        |
| 7.2      | DATA FÖR GEOGRAFISK INDELNING .....                | 11        |
| 7.3      | DATA FÖR VATTENBALANS .....                        | 12        |
| 7.4      | DATA FÖR KLIMATEGENSKAPER.....                     | 13        |
| 7.5      | DATA FÖR SEDIMENTATIONS DYNAMIK.....               | 14        |
| 7.6      | EMISSIONER OCH HALTDATA.....                       | 14        |
| <b>8</b> | <b>ATT ANVÄNDA POP CYCLING-BRÅVIKEN .....</b>      | <b>15</b> |

|           |                                                                      |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 8.1       | ALLMÄNT .....                                                        | 15        |
| 8.2       | ATT SÄTTA UPP ETT SCENARIO .....                                     | 15        |
| 8.3       | ATT SPARA OCH ANVÄNDA RESULTATFILER .....                            | 22        |
| 8.4       | HANTERING AV FILER .....                                             | 24        |
| <b>9</b>  | <b>RESULTAT FÖR BRÅVIKENS 0-ALTERNATIV .....</b>                     | <b>25</b> |
| 9.1       | BESKRIVNING AV SCENARIO .....                                        | 25        |
| 9.2       | MÄNGDFÖRDELNING INOM BRÅVIKEN .....                                  | 25        |
| 9.3       | MASSFLÖDEN I DE INRE DELARNA .....                                   | 26        |
| 9.4       | MASSFLÖDEN I DE YTTRE DELARNA .....                                  | 28        |
| 9.5       | HALTFÖRÄNDRINGAR ÖVER TID .....                                      | 29        |
| 9.6       | UTVÄRDERING AV MODELLERINGSRESULTAT MOT UPPMÄTTA HALTER I FISK ..... | 31        |
| 9.7       | SYSTEMFÖRÄNDRINGAR KOPPLADE TILL BELASTNING FRÅN MOTALA STRÖM .....  | 32        |
| <b>10</b> | <b>SLUTSATSER OM KÄLLOR OCH ÅTGÄRDER I BRÅVIKEN .....</b>            | <b>34</b> |
| 10.1      | SAMMANVÄGD BEDÖMNING AV EMPIRISKA DATA OCH MODELLRESULTAT .....      | 34        |
| 10.2      | OSÄKERHETER I MODELLERINGEN .....                                    | 34        |
| 10.3      | SLUTSATSER KRING ÅTGÄRDER I BRÅVIKEN .....                           | 35        |
| <b>11</b> | <b>SLUTSATSER KRING TILLÄMPNING AV VERKTYGET .....</b>               | <b>37</b> |
| <b>12</b> | <b>REFERENSER .....</b>                                              | <b>39</b> |

## BILAGOR

|          |                                              |
|----------|----------------------------------------------|
| BILAGA 1 | PARAMETERLISTA                               |
| BILAGA 2 | ANVÄNDARMANUAL                               |
| BILAGA 3 | FÖRTECKNING ÖVER RESULTATFILER               |
| BILAGA 4 | SIMULERADE MASSFLÖDEN 0-ALTERNATIVET ÅR 2011 |
| BILAGA 5 | INGÅNGSDATA FÖR SIMULERING AV PCB-28         |

# 1 Inledning

## 1.1 Introduktion

Denna rapport redovisar resultat från projektet ”Källfördelning av miljögifter i Bråviken- en utvärdering av åtgärder för minskad föroreningsbelastning”. Projektet genomfördes mellan augusti 2009 och mars 2011, med medel från Naturvårdsverkets Havsmiljöanslag (dnr 309-1692-09 Nh).

Deltagande parter var Länsstyrelsen Östergötland (projektägare), Hifab AB (projektledare) och Stockholms Universitet (modelleringsexpertis).

## 1.2 Bakgrund

Bakgrunden till arbetet som utförts är länsstyrelsen Östergötlands behov att finna effektiva åtgärder som kan bidra till att höja den kemiska och ekologiska statusen i länets vattenförekomster. Genom Vattendirektivet ställs krav på att åtgärder påbörjas senast 2012 för att god status ska kunna uppnås.

Statusen i våra vattendrag kan relativt enkelt fastställas genom mätningar av kemiska parametrar som visar på graden av påverkan i vatten, sediment och vattenlevande organismer. Att identifiera de mest kritiska källorna/mekanismerna som ger upphov till denna påverkan är betydligt svårare då flera olika källor och mekanismer kan samverka. Ännu svårare är det att veta vilka åtgärder som kan ge de mest tydliga, positiva effekterna om åtgärder utförs samt inom vilken tidsrymd som förändringar kan förväntas ske. Det finns också en pågående, naturlig återhämtning i miljön i och med att emissioner minskar i takt med strängare krav på utsläppsmängder och föroreningar i miljön bryts ned, omvandlas och begravs i djupare liggande mark- och sedimentlager. Takten på den naturliga återhämtningen är ofta svår att förutsäga enbart baserat på ett fåtal mätningar då systemet påverkas av en rad olika processer som är föränderliga över tid.

För att optimera användningen av samhällets resurser är det viktigt att rätt sorts åtgärder identifieras och att åtgärderna fokuseras på de områden där den naturliga återhämtningen är för långsam för att fastställda miljökvalitetsnormer ska uppnås inom rimlig tidsrymd.

## 1.3 Syfte

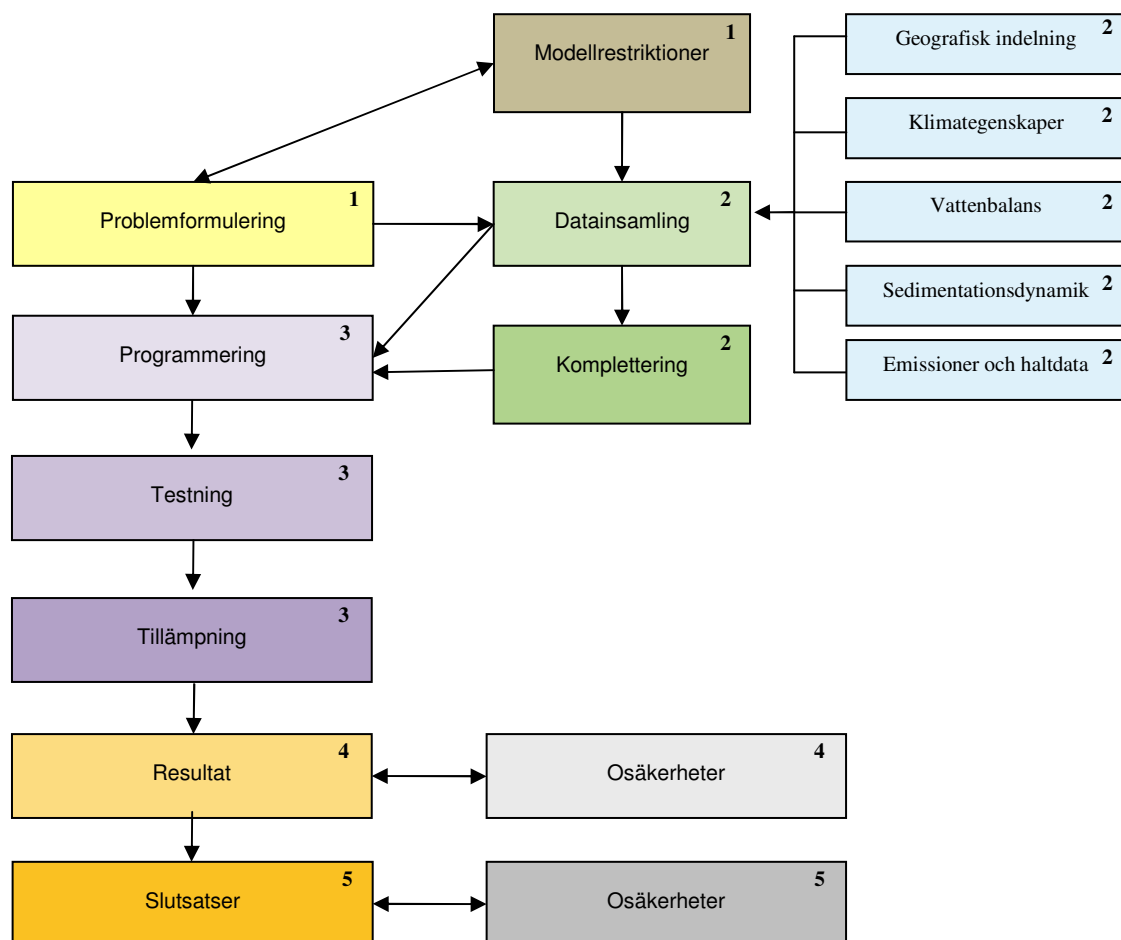
Projektets primära syfte var att undersöka vilka processer som styr spridningen av föroreningar inom Bråviken för att därigenom kunna identifiera de framtida åtgärder som förväntas vara mest effektiva för att förbättra Bråvikens ekologiska/kemiska status. Som en del i detta avsåg projektet även att undersöka i vilken utsträckning som Bråviken bidrar med belastningen av föroreningar i Östersjön.

Ett ytterligare syfte var att introducera ett för länsstyrelsen nytt verktyg som bygger på massbalansmodellering av föroreningar baserat på fugacitetskonceptet. Denna typ av modellverktyg används frekvent inom forskarvärlden för att studera liknande frågeställningar som de som länsstyrelsen står inför, fast ur ett vetenskapligt perspektiv. Projektet har därför

inneburit en möjlighet att undersöka modellverktygets funktion ur ett myndighetsperspektiv och med de resurser som länsstyrelser kan förfoga över.

## 2 Arbetsgång

Projektet har genomförts i en stegvis process med utgångspunkt från projektbeskrivningen som lämnades till Naturvårdsverket i februari 2009. Arbetsgången som tillämpats beskrivs av Figur 1.



Figur 1. Illustration av arbetsgången inom projektet.

Det initiala steget var att konkretisera de frågeställningar som länsstyrelsen möter genom sitt arbete med Vattendirektivet. Myndigheten blev närmare introducerad i vilka krav som massbalansmodeller ställer på datatillgång, hur de kan tillämpas, etc. Utifrån detta formulerades det myndighetsproblem som utgjorde grund för utvecklingen av modellverktyget.

Stora delar av det praktiska arbetet bestod i princip av två olika delar: datainsamling och programmering. Dessa delar utfördes parallellt med varandra under en längre tid. En

avstämning kunde därmed göras om det saknades väsentliga data och det fanns tid att göra vissa kompletteringar.

Då programmeringen slutförts och modellen testats i syfte att upptäcka felaktigheter i koden tillämpades modellen för Bråvikensystemet i ett scenario för 0-alternativet.

Vid tolkningen av resultaten har osäkerheter i både modellens utformning och dataunderlaget beaktats så att resultaten inte ska tolkas som mer säkra eller sanna än vad dataunderlaget tillåter. Resultaten från modelleringarna har sedan legat till grund för ett antal slutsatser som länsstyrelsen ska kunna dra nytta av i sitt fortsatta arbete med att ta fram åtgärder för Bråviken.

### **3 Begränsningar av projektets omfattning**

Under arbetets gång har omfattningen av projektet reviderats, framförallt på grund av olika modell- och datatekniska begränsningar som framkommit i och med att arbetet utvecklats. I dagsläget har Länsstyrelsen Östergötland behov av att identifiera åtgärder för att öka Bråvikens status med avseende på PCB, kvicksilver, PAH, bly, krom och koppar.

Projektets initiala utgångspunkt var att både PCB och kvicksilver skulle processas i modellen. När programmeringen påbörjades visade det sig svårt att inom budgetramen hitta en bra teknisk lösning för att hantera massbalanser av två ämnen med så pass skilda fysikaliska-kemiska egenskaper.

En enklare modellering av kvicksilver hade eventuellt varit möjlig men tid och personella resurser utgjorde begränsande faktor. Som alternativ undersöktes om PAH skulle kunna ingå i projektet då dessa ämnen har liknande egenskaper som PCB. Detta alternativ förkastades dock då det visade sig att tillgången till befintliga emissions- och haltdata var begränsad och det fanns varken tids- eller kostnadsmässigt utrymme att planera in kompletterande mätningar för dessa ämnen. Projektet reducerades således till att enbart inkludera de 7 PCB-isomerer som hädanefter omnämns som PCB<sub>7</sub> (PCB-28, PCB-52, PCB-101, PCB-118, PCB-138, PCB-153 och PCB-180).

## **4 Beskrivning av Bråviken**

### **4.1 Fysisk och geografisk utbredning**

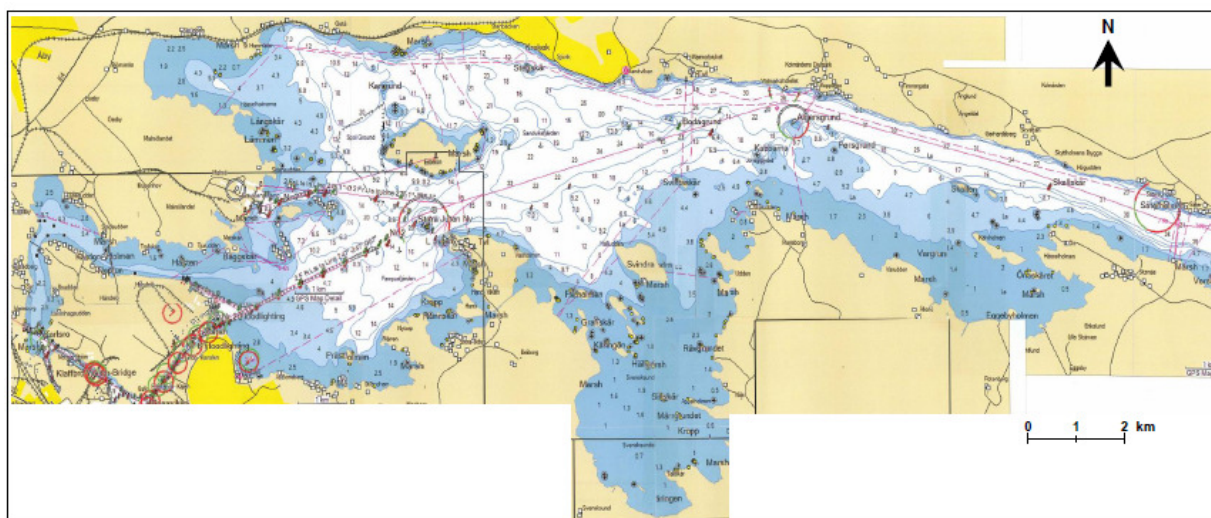
Bråviken är ett ca 4 mil långt brackvattensystem som förbinder Motala ström med Östersjön (Figur 2). Den inre delen av viken gränsar till Norrköpings stad och hela vattensystemet utgör en viktig fartygsled till Norrköpings hamn. Närområdet kännetecknas främst av jord- och skogsbruk och några mindre samhällen. Viken mynnar i Bosjöfjärden som står i direkt förbindelse med Östersjön. Yrkesfiske bedrivs i mindre omfattning.





Figur 2. Vy över Bråvikens sträckning.

Bråviken har en skiftande djupprofil med branta kanter mot norr och flacka kanter mot söder (Figur 3). Längs den norra stranden löper en djup ränna där bottendjupet ställvis uppgår till ca 35-40 m. I de inre delarna samt i Svensksundsviken och Ållonöfjärden är vattnet betydligt grundare med djup på ca 4-15 respektive 1-2 m.



Figur 3. Översikt av vattendjup inom delar Bråviken (från Hifab, 2009).

Bråviken påverkas i huvudsak av inflödande vatten från två olika håll: dels av sötvatten från Motala ström (som mynnar i Pampusfjärden strax utanför Norrköpings tätort) dels av inströmmande saltvatten från Östersjön. Mindre vattendrag som mynnar i viken förekommer längs både södra och norra stranden.

Akkumulationsbottnar (d.v.s. områden där partiklar avsätts och sediment byggs upp över tiden) återfinns främst i samband med djupa vatten men sannolikt även i områden där vattendjupen är ringa (Figur 4).



Figur 4. Utbredning av ackumulationsbottnar på djup större än 6 meter (SGU, 2002).

Akkumulationsbottnarnas utbredning är inte statisk utan varierar över tid. I de inre delarna av Bråviken har sedimenten en tillväxthastighet på 12-24 mm per år medan hastigheten är något lägre i de yttre delarna (10 mm per år, SGU, 2002).

## 4.2 Kända föroreningskällor

De huvudsakliga föroreningskällorna i Bråviken är framförallt historiska och har sitt ursprung i de industriella aktiviteter som bedrivits i de inre delarna. T.ex. förekommer pappersmassaproduktion, hamnverksamhet, avfallsförbränning, oljedepåer och superfosfatfabrik. Tidigare har även textilindustri funnits i området. Delar av hamnområdet har tidigare fyllts ut med muddermassor, varav vissa troligtvis varit kraftigt förorenade.

Den källa som är mest undersökt är sedimenten. I hur hög grad som Norrköpings tätort bidrar till föroreningsbelastningen via t.ex. trafik, reningsverk och dagvatten är idag inte känt. Utöver de industriella källorna kan atmosfären bidra med diffus förorening av bl.a. PCB, kvicksilver och PAH. Tillskott av föroreningar kan även komma via Motala ström som mynnar i Bråvikens inre delar.

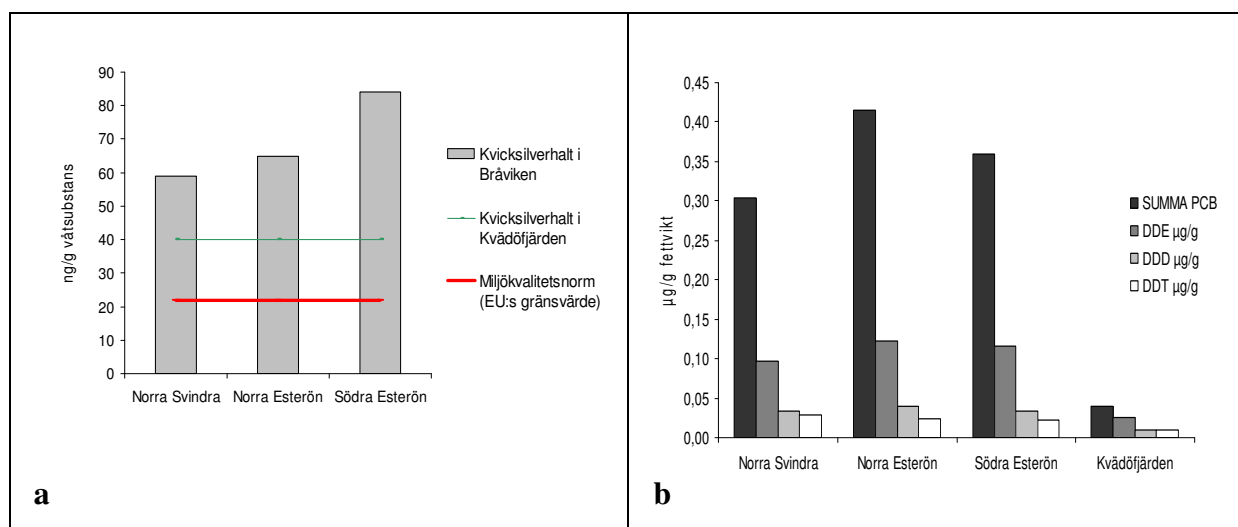
## 4.3 Föroreningssituation

Föroreningssituationen i Bråviken har undersökts i ett flertal olika sammanhang. Resultaten visar att sedimenten ställvis är förorenade med både tungmetaller och organiska ämnen, såsom PCB, PAH och dioxin.

Situationen är värst i de inre delarna som gränsar till hamnområdet och flera tunga industrier. Föroreningsnivån har dock inte ansetts som alarmerande hög i jämförelse med olika klassningsgränser som är framtagna av Naturvårdsverket (Hifab, 2009). I tidigare utredningar har frågetecken lyfts kring hur föroreningarna sprids på både lång och kort sikt (Hifab, 2009). Vissa resultat tyder på att koncentrationsgradienten för tungmetaller ökar ut mot havet, vilket i så fall innebär att Bråviken skulle kunna vara en lokal källa till Östersjön genom föroreningstransport från de inre delarna.

Både kvicksilver och PCB förekommer i förhöjda halter i Bråvikens abborrar (Figur 5). Även andra organiska miljögifter (t.ex. DDT) påträffas i förhöjda halter. Åldern på fiskarna som analyserades i denna undersökning var ca 3-5 år, vilket indikerar att det finns en dagsaktuell, förhöjd exponering. Även om PCB och kvicksilverhalterna är förhöjda medför de i allmänhet inte några intagsrestriktioner baserat på hälsorisker för människor. Undantaget är för gravida kvinnor eftersom foster har en högre känslighet för exponering jämfört med vuxna människor. Kviksilverhalterna överskrider vattendirektivets miljö kvalitetsnorm som indikerar om det

föreligger risk för negativa effekter på fåglar och däggdjur som äter fisk. Överskridanden av kvicksilvernormen förekommer dock allmänt i Sverige.



Figur 5. Halter av a) kvicksilver (ng/g våtvikt), b) PCB och DDT/DDD/DDE (µg/g fett) i abborre från Bråviken samt referensområdet Kvädöfjärden (Länsstyrelsen Östergötland).

#### 4.4 Status enligt vattendirektivet

Länsstyrelsen Östergötland har klassat Bråviken som ett av länets 30 mest prioriterade förorenade områden. Den ekologiska statusen enligt Vattendirektivets miljökvalitetsnormer anses som måttlig för PCB, krom och koppar. Den kemiska statusen uppfyller ej god status med avseende på kvicksilver, bly och PAH.

I enlighet med Vattendirektivet ska statusförbättrande åtgärder för Bråviken vara påbörjade senast 2012. Exakt vilka källor som behöver åtgärdas saknar länsstyrelsen kunskap om. Likaså saknas kunskap om de huvudsakliga mekanismer som bidrar till att föroreningarna sprids inom Bråviken.

## 5 Bakgrund till massbalansmodellering

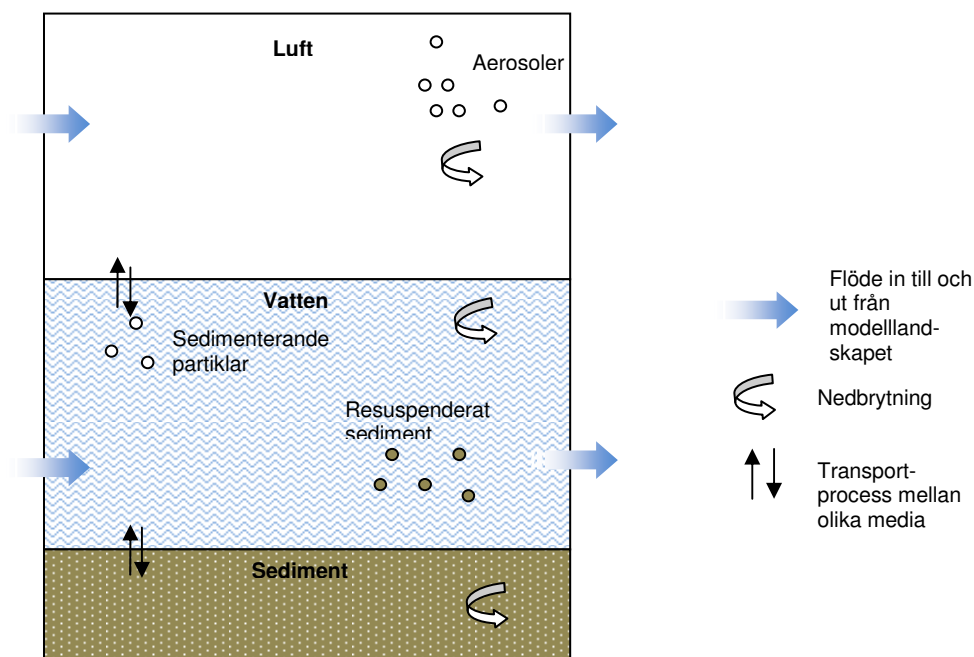
### 5.1 Box-principen

Massbalansmodeller utgörs av matematiska modeller där fördelning, förekomst och spridning av kemiska substanser i miljön kan studeras som en följd av olika utsläpp. Modellerna kan även kallas för spridningsmodeller, multimediamodeller eller boxmodeller. En teoretisk introduktion till den typ av massbalansmodellering som tillämpats i detta projekt ges av Mackay (2001). Illustrativa exempel på hur massbalansmodelleringar tillämpats för att undersöka spridning av föroreningar i andra fall ges t.ex. av MacLeod (2005), NIVA (2005) och Naturvårdsverket (2009).

Principen för en massbalans innebär att summan av in- och utgående föroreningsmängder i en modellbox utgör den mängd som är kvar i boxen. Massbalanser upprättas också för vattenflöden i modeller som beskriver akvatiska system. Metoden bygger på att den fysiska

miljön beskrivs i form av fördelningsrum (boxar) som representerar olika typer av media (t.ex. vatten, luft och sediment, se Figur 6). En uppsättning fördelningsrum utgör tillsammans ett modellandskap som definieras av olika landskaps- och klimatförhållanden.

Ett grundläggande antagande som görs är att alla landskapsegenskaper och föroreningar fördelar sig homogent inom varje fördelningsrum. En rumslig upplösning åstadkoms istället genom att koppla samman de homogena boxarna i två eller tre dimensioner. Ju högre upplösning, desto större krav ställs på tillgången på indata och det är inte självklart att komplicerade modeller ger mer riktiga svar än minde avancerade varianter.



Figur 6. Schematisk illustration över ett modellandskap som består av luft, vatten och sediment samt processer som beskriver spridning och omvandling av föroreningar som introduceras i form av emissioner.

## 5.2 Introduktion av föroreningar

Föroreningar introduceras i modellandskapet antingen som emissioner eller som initiala koncentrationer i olika media. Emissioner kan t.ex. representera ett ytvattenflöde eller ett direktutsläpp som mynnar i ett fördelningsrum. Initiala koncentrationer används för att beskriva befintlig föroreningsnivå i t.ex. jord, sediment, vatten och luft. Spridning och omvandling av föroreningar mellan olika media beskrivs av en uppsättning algoritmer som tar hänsyn till ämnens fysikaliska-kemiska egenskaper samt egenskaper i miljön, t.ex. flödes hastigheter, partikelhalt, innehåll av organiskt kol, etc.

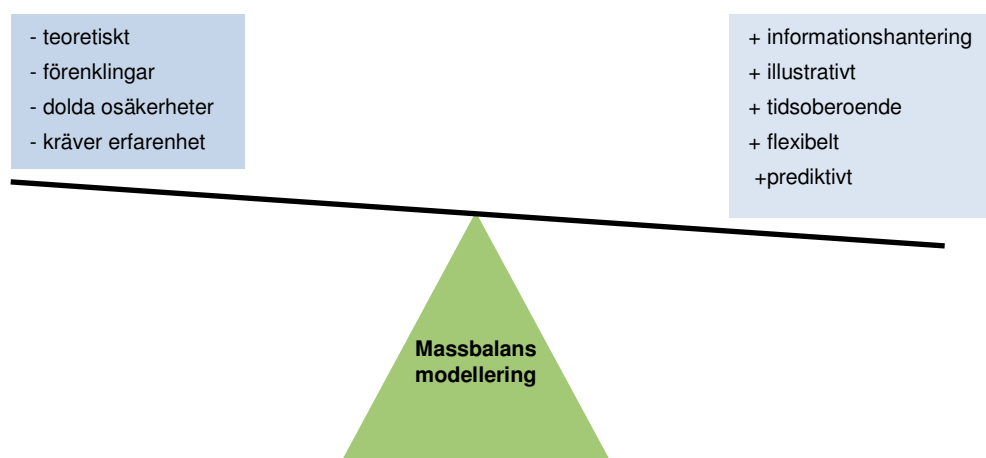
## 5.3 Komplexitet

Massbalansmodeller kan byggas upp med varierande grad av komplexitet. I dynamiska modeller finns en tidsupplösning som medger att villkoren kan ändras under simuleringens

gång. Varken jämvikt eller steady-state behöver råda. Dynamiska modeller medger att effekter av simulerade åtgärder kan studeras för olika modellscenarier längs en oavbruten tidsaxel. Sådana simuleringar ger information om systemets förväntade återhämtningstid från tidpunkten då åtgärden simulerades. För modeller som enbart bygger på antaganden om kemisk jämvikt eller steady-state kan man endast erhålla ögonblicksbilder av föroreningsspridningen vid olika tidpunkter och olika händelseförlopp kan inte följas.

#### 5.4 Massbalansmodelleringens för- och nackdelar

Att använda massbalansmodeller som utrednings- och beslutverktyg har både för- och nackdelar (Figur 7). Det är inte alltid självklart i vilka situationer som de kommer till sin rätt.



Figur 7. För- och nackdelar med att jobba med massbalansmodeller.

Till massbalansmodellernas fördelar hör att de ger ökad förståelse för hur komplexa kemiska, biologiska och fysiska processer i miljön samverkar i en given situation. Information och data som berör olika delar av ett system processas samtidigt vilket innebär att man erhåller en samlad bild av vilka processer som dominerar och man kan lära sig mer om hur systemet uppför sig vid givna förhållanden. Eftersom de olika modellparametrarna kan varieras över en tidsaxel kan massbalansmodeller hjälpa oss att undersöka förväntade effekter om olika källor tillkommer eller upphör, eller om miljön påverkas genom t.ex. klimatförändringar, årstidsvariationer, flödesändringar, etc.

Nackdelen med massbalansmodeller är att de bygger på en rad förenklingar av verkligheten. Detta introducerar en osäkerhet i simuleringarna, vilket påverkar hur resultaten kan/bör tolkas. Alla modeller innehåller således per automatik en viss grad av osäkerhet (s.k. modellosäkerhet) som är kopplad till modellens struktur och uppbyggnad. Därtill kommer osäkerheter kopplade till parametervärden som ingår i modellen, samt osäkerheter kopplade till kunskapsbrist om det system som ska studeras.

Att lära sig att jobba med modeller tar tid och tolkning av resultat kräver erfarenhet av modellsimuleringar och kunskap om hur modellerna är uppbyggda. Modellresultat bör om möjligt tolkas och utvärderas i kombination med empiriska data då detta bidrar till att minska osäkerheten i slutsatser som dras.

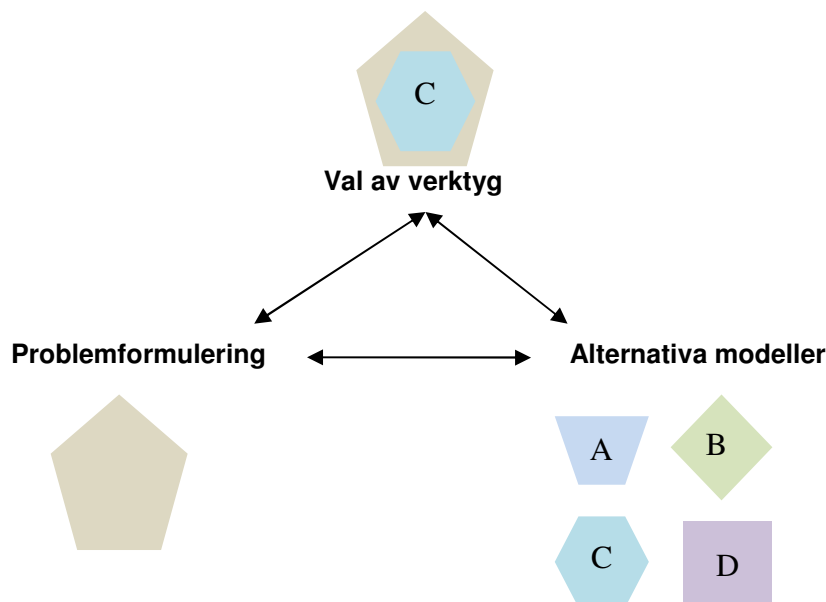


## 6 Problemformulering Bråviken

### 6.1 Allmänt

Problemformulering är ett viktigt steg vid alla typer av massbalansmodellering verktyget behöver ha en god konceptuell överensstämmelse med det problem som ska undersökas (Figur 8). Vid valet av verktyg kan man i princip gå två olika vägar: antingen väljer man en färdigutvecklad, mer generell modell som i det mest optimala fallet kan anpassas till den frågeställning man avser undersöka, eller så konstruerar man en platsspecifik modell som utformas specifikt efter frågeställningen.

Båda metoderna har sina för- och nackdelar. Väljer man att jobba med färdiga modeller kan man behöva göra en initial screening av vilka modeller som finns tillgängliga. Därefter behöver man göra ett urval, baserat på ett antal kriterier som är väsentliga för frågeställningen, i syfte att identifiera det mest lämpliga verktyget.



*Figur 8. Principskiss som visar hur problemformuleringen jämförs mot olika modeller i syfte att identifiera det verktyg som har bäst förutsättningar att hantera det problem man avser att undersöka. Eftersom alla modeller utgör kraftiga förenklingar av naturligt komplexa processer finns det ingen modell som kan återge de exakta förhållandena.*

Oavsett vilket verktyg man väljer att jobba med kommer både generella och platsspecifika data att behöva läggas in. Exakt vilka parametrar som ingår i modeller varierar men att undersöka kraven på ingångsdata kan vara ett första steg för att avgöra vilken modell som kan vara lämplig. En enkel tumregel är att ju mer komplicerad en modell är, ju fler parametrar ingår och desto högre krav ställs på dataunderlaget. Om tillgången på data är begränsad kan det vara en bättre idé att välja en något enklare modell än att välja en avancerad modell med hög upplösning som begränsas av ett litet dataunderlag. Oavsett vilket verktyg man jobbar med medför bristande dataunderlag att resultattolkningen försvåras. Resultaten kan också vara

förknippade med sådana osäkerheter att konkreta slutsatser knappast kan innan mer resurser lagts på att generera nödvändiga ingångsdata.

## 6.2 Projektets utgångspunkt

I projektet utvecklades en platsspecifik massbalansmodell som var anpassad för Bråviken. Det fanns dock en önskan om att verktyget skulle medge en flexibel användning även vid andra objekt. Genom att utveckla en platsspecifik modell från grunden fanns en fördel i att verktyget kunde anpassas direkt till objektet. Projektet kunde också dra nytta av erfarenheter som ITM gjort vid liknande modelltillämpningar som utförts för förorenade fjordar i Norge (NIVA, 2005) och för Östersjön (Naturvårdsverket, 2009). Därmed kunde man dra fördel av att det fanns en grundstruktur att bygga vidare på och allt programmeringsarbete behövde inte utföras från grunden.

## 6.3 Problemformulering

För att identifiera de mest effektiva åtgärderna för Bråviken behövde mekanismerna som styr spridningen av PCB fastställas. Ämnenas hydrofoba egenskaper gör att de fördelas till organiska faser i miljön. Dessa kan utgöras av lipider i levande organismer eller ytor av organiskt kol på partiklar. Av erfarenhet vet man att sedimentationsdynamiken och partiklarnas sammansättning med avseende på organiskt kol är kritiska faktorer som har en stor inverkan på hur hydrofoba ämnen sprids i akvatiska miljöer efter utsläpp.

Kända källor är i huvudsak sedimenten. Pågående emissioner från industrier, förorenade områden, utfyllnadsmassor och dagvatten från Norrköpings tätort är inte kartlagda. Atmosfären kan bidra till förekomst av PCB i Bråviken genom deposition över vattenytan. Faktorer som fartygstrafik och muddring kan ha en negativ inverkan på belastningen om dessa aktiviteter leder till en ökad omrörning av sedimenterade partiklar.

Eftersom stora delar av sedimenten endast är måttligt förorenade och mindre delområden innehåller mycket förhöjda föroreningshalter är det inte givet att åtgärder inom de mest förorenade områdena kommer att bidra till en statusförbättring inom Bråviken som helhet. Föroreningssituationen påverkas således av en rad olika faktorer.

Frågor som skulle undersökas genom modellapplikationen var

- 1) hur olika källor förväntas påverka föroreningsbelastningen idag och i framtiden om inga åtgärder sätts in
- 2) vilka mekanismer som styr spridningen av föroreningar inom Bråvikens delområden samt ut mot Östersjön
- 3) hur stort flödet av föroreningar är mellan olika medier och mellan olika delar av Bråviken
- 4) hur lång den naturliga återhämtningstiden är om inga åtgärder utförs
- 5) var eventuella åtgärder borde sättas in för att ha störst effekt på reduceringen av föroreningar

## 7 Datainsamling

### 7.1 Allmänt

Önskad struktur på verktyget var en tvådimensionell, dynamisk massbalansmodell med två olika vattenskikt: ett ytvatten och ett bottenvatten. Datainsamlingen har bedrivits med utgångspunkt från parametrar som ingår i massbalansens algoritmer.

Modellandskapet som återger Bråviken består av åtta geografiska enheter som är sammankopplade på längden. Beroende på djupförhållanden består de geografiska enheterna av tre (luft, vatten och ytsediment) eller fyra fördelningsrum (luft, ytvatten, djupvatten och ytsediment).

I efterföljande stycken beskrivs tillvägagångssättet för datainsamlingen som utförts baserat på följande kategorier: geografisk indelning, klimatdata, vattenbalans, sedimentationsdynamik och emissioner.

En lista över parametrar som ingår i POP-cycling Bråviken är bifogad i Bilaga 1.

### 7.2 Data för geografisk indelning

Genom arbetet med Vattendirektivet har Bråviken blivit indelad i 8 olika vattenregioner: Loddbyviken, Pampusfjärden, Inre Bråviken, Svensksundsviken, Mellersta Bråviken, Ållonöfjärden, Yttre Bråviken och Bråvikens kustvatten (Figur 9).



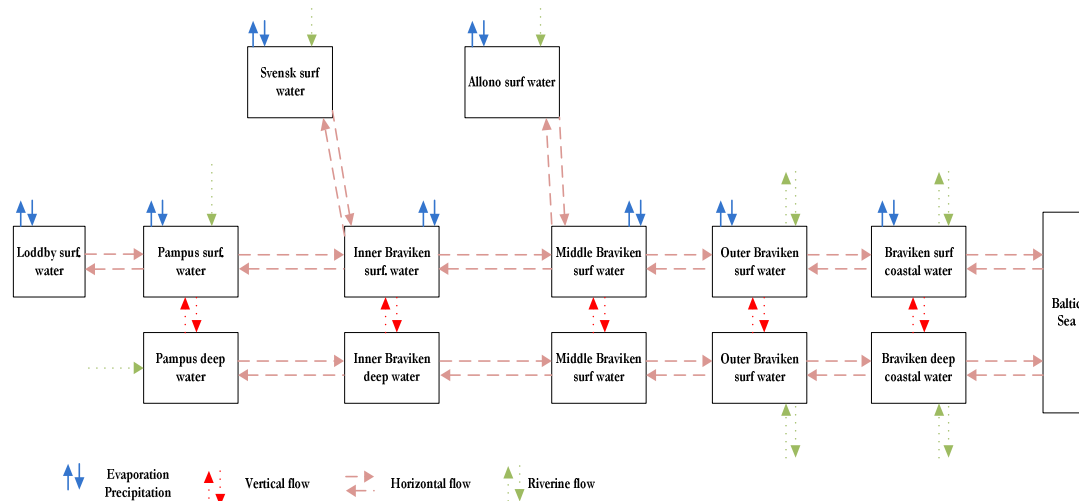
*Figur 9. Indelning av Bråviken i vattenregioner genom arbetet med Vattendirektivet.*

Tidigare har det funnits en annan indelning av Bråviken som bestod av 6 vattenregioner. De tre nuvarande delarna Loddbyviken, Pampusfjärden och Inre Bråviken utgjorde då en enhet som kallades Inre Bråviken. Den gamla indelningen med 6 områden ligger till grund för en kustzonmodell som utvecklats av SMHI i syfte att bedöma miljötillståndet längs Sveriges kustvatten med avseende på näringsämnen (SMHI, 2003).

Då samma typ av indata ingår i både kustzonmodellen och de massbalansmodeller som ITM jobbar med bestämdes det att Bråvikenmodellen skulle följa samma geografiska indelning som kustzonmodellen, med utantag för den inre delen som splittrades i tre delområden.



Figur 10 visar schematiskt hur Bråvikenmodellen är indelad i 8 geografiska regioner där vissa består av två olika vattenskikt.



Figur 10. Schematisk illustration över Bråvikenmodellens 8 geografiska regioner samt uppdelning i yt- och djupskikt inklusive flöden till, från och mellan boxarna.

Anledningen till att två olika vattenskikt använts är att språngskikt förekommer mellan salt djupvatten och sött ytvatten i vissa delar av Bråviken. Enligt information från SMHI visade det sig att djupet för det salina språngskiktet har en årstidsbunden variation och språngskiktets läge varierar även mellan Bråvikens olika delar. Enligt SMHI ansågs 10 m vara ett representativt medelvärde på språngskiktets djup. Språngskiktet saknas i de grunda delarna (Loddbyviken, Svensksundsviken och Ållonöfjärden) då det totala vattendjupet ligger kring 2 m. Detta innebär att dessa delområden representeras av endast ett vattenskikt i modellen.

Den vertikala uppdelningen medför att man kan få en tydligare bild av hur de förorenade sedimenten påverkar djupare liggande vatten. För ytvatten kan andra källor (t.ex. atmosfären) spela större roll.

### 7.3 Data för vattenbalans

Fysiska parametrar som beskriver ytare och djup för boxarna, vattenströmmar och inflödande ytvatten från biflöden utgör grunden för att upprätta en vattenbalans för systemet. Samtliga parametrar som ingår i denna kategori är sammanställda i Tabell 1. Hänvisning ges även till de datakällor som använts. Vattenbalansen innebär att inkommande flöden balanseras av utgående flöden inom varje modellbox samt inom hela systemet.

Tabell 1. Fysiska parametrar för upprättande av vattenbalans samt hänvisning till datakällan. Observera att vissa parametrar inte ingår i alla boxar.

| Parameter | Enhet | Datakälla |
|-----------|-------|-----------|

|                                      |                                |                                               |
|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|
| Total surface area of drainage basin | m <sup>2</sup>                 | SMHI <sup>a</sup>                             |
| Surface area of surface layers       | m <sup>2</sup>                 | SMHI <sup>a</sup> /Länsstyrelsen <sup>b</sup> |
| Depth of surface layers              | m                              | SMHI <sup>a</sup>                             |
| Surface area of deep layers          | m <sup>2</sup>                 | SMHI <sup>a</sup> /Länsstyrelsen <sup>b</sup> |
| Depth of deep layers                 | m                              | SMHI <sup>a</sup>                             |
| Fresh water inflow                   | m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> | SMHI <sup>a</sup>                             |
| Baltic inflow to outer Bråviken      | m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> | SMHI <sup>a</sup>                             |
| Current velocities                   | cm s <sup>-1</sup>             | -                                             |

<sup>a</sup> data som ingår i SMHI:s kustzonmodell, <sup>b</sup> data producerat av Aqua Biota AB på uppdrag av Länsstyrelsen Östergötland

Vattenbalansen i POP-cycling Bråviken (dvs. volymen vatten som flödar genom modellandskapet) är i huvudsak baserad på hypsografiska data som tillhandahålls av SMHI. Eftersom dessa data endast fanns för 5 av 8 geografiska regioner togs resterande data fram av en konsultbyrå på beställning av länsstyrelsen.

För att upprätta vattenbalansen utgick man från den totala vattenvolymen för respektive område. Därefter skattades modellregionernas ytareor för ytvatten och djupvatten. Medeldjupet (som representerar det salina språngskiktet som i verkligheten ligger på ca 10 m djup) beräknades genom kvoten mellan volymen och ytarean. Därtill behövdes information om inflödande ytvatten från biflöden och inflödande saltvatten från Östersjön. I huvudsak är det Motala ström som bidrar med inkommande sötvatten. Övriga biflöden utgörs av mindre bäckar/åar och deras bidrag till vattenbalansen har ansetts försumbar.

## 7.4 Data för klimategenskaper

Parametrar som beskriver klimatet i modellen är sammanställda i

Tabell 2. Ingångsvärden för dessa parametrar erhöles via SMHI och utgör samma data som ingår i SMHI:s kustzonmodell. Eftersom klimatparametrar varierar över året har månadsmedelvärden beräknats.

*Tabell 2. Parametrar som beskriver klimategenskaper i modellvärlden.*

| <i>Parameter</i>             | <i>Enhet</i>          | <i>Datakälla</i>  |
|------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Average air temperature      | °C                    | SMHI <sup>a</sup> |
| Precipitation rate           | mm year <sup>-1</sup> | SMHI <sup>a</sup> |
| Average wind speed (at 10 m) | m s <sup>-1</sup>     | SMHI <sup>a</sup> |
| Average water temperature    | °C                    | SMHI <sup>a</sup> |

<sup>a</sup>data som ingår i SMHI:s kustzonmodell PROBE

## 7.5 Data för sedimentationsdynamik

För hydrofoba ämnen är sedimentationsförhållanden samt innehållet av organiskt C i vattnet av stor vikt för hur föroreningarna sprids och fördelas inom systemet. Tabell 3 redovisar nödvändiga ingångsdata för att beskriva sedimentationsdynamiken i modellen.

Tabell 3. Parametrar som beskriver sedimentationsdynamik och innehållet av organiskt C i vattnet.

| Parameter                                              | Enhet                                  | Datakälla                            |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Primary productivity                                   | g C m <sup>-2</sup> year <sup>-1</sup> | -                                    |
| Concentration of suspended solids (SS) in water column | g m <sup>-3</sup>                      | -                                    |
| Organic carbon content of SS                           | % (mass)                               | -                                    |
| Sediment area as fraction of water area                | %                                      | Länsstyrelsen <sup>a</sup>           |
| Fraction accumulation bottom of sediment area          | %                                      | SGU, 2002/Länsstyrelsen <sup>a</sup> |
| Gross sedimentation rate                               | mm year <sup>-1</sup>                  | -                                    |
| Net sedimentation rate (=sediment burial rate)         | mm year <sup>-1</sup>                  | SGU, 2002                            |
| Organic carbon content of sediment solids              | % mass                                 | -                                    |
| Sediment active layer                                  | m                                      | -                                    |

<sup>a</sup> data producerat av Aqua Biota AB på uppdrag av Länsstyrelsen Östergötland

Vid datainventeringen som utfördes av projektet visade det sig att bristfälligt med data fanns för att beskriva sedimentationsdynamiken. Utsättning av sedimentfällor för att mäta sedimentationshastigheten (gross sedimentation rate) gjordes under juni 2010 men provtagningen generade inga data då fällorna var försvunna vid återbesöket i augusti. För övriga parametrar har rimliga värden ansatts av ITM baserat på erfarenhet från tidigare projekt. Bristen på platsspecifika data utgör en osäkerhet i modelleringen.

## 7.6 Emissioner och haltdata

Uppgifter om halter och emissioner i Bråviken enligt Tabell 4 kommer från flera olika källor, t.ex. tidigare utförda undersökningar av sediment och vatten, uppgifter från nationell miljöövervakning och tillsynsverksamhet.

Tabell 4. Parametrar som beskriver emissioner och föroreningshalter i olika media.

| Parameter                          | Enhet                    | Datakälla                  |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Concentration in sediment          | mg kg <sup>-1</sup> d.w. | Länsstyrelsen <sup>a</sup> |
| Concentration in water of Bråviken | pg l <sup>-1</sup>       | -                          |
| Concentration in inflowing rivers  | pg l <sup>-1</sup>       | Länsstyrelsen <sup>a</sup> |
| Concentrations in air              | fg m <sup>-3</sup>       | IVL, miljöövervakning      |

|                                    |                          |         |
|------------------------------------|--------------------------|---------|
| Concentrations in Baltic Sea water | pg l <sup>-1</sup>       | NV 5219 |
| Emission                           | tones year <sup>-1</sup> |         |

<sup>a</sup>Sammanställning av data i olika rapporter och undersökningar som länsstyrelsen haft tillgång till

När länsstyrelsen hade sammanställt dataunderlaget för PCB visade det sig vara bristfälligt. Huvuddelen av utförda undersökningar var förlagda i de inre delarna. Placeringen av provpunkterna och provtagningsdjupen var inte alltid representativa för sedimentskiktet på 0-5 cm i modellen. Data saknades helt för de yttre delarna. Uppgifter om PCB-halter i grundvatten i områden som fyllts ut med gamla muddermassor saknades. Dessa områden har länsstyrelsen betraktat som möjliga lokala källor.

För att utöka underlaget som beskriver dagens miljötillstånd i Bråviken med avseende på PCB ansökte projektet om ett extra anslag från Havsmiljöanslaget för att genomföra kompletterande provtagningar under sommaren 2010.

Fältundersökningarna omfattade installation och provtagning av grundvattenrör vid utfyllnadsområdena kring Loddbyviken och Pampusfjärden (SGI, 2010) samt provtagning av ytliga sediment i olika delområden och provtagning av abborre från Bråvikens yttre delar (Hifab, 2011). Samtliga PCB-analyser utfördes av IVL som erbjuder låga detektionsgränser vilket var prioriterat i detta projekt.

## 8 Att använda POP Cycling-Bråviken

### 8.1 Allmänt

Programmering av POP Cycling-Bråviken har utförts av personal på ITM. Modellen bygger på en tidigare utvecklad modell (POP Cycling-Baltic) som tillämpats för dioxin, PCB och HCB i Östersjön (Naturvårdsverket, 2009). POP Cycling-Bråviken består av öppen kod som är gjord i Microsoft Visual Basic 6.0.

Tekniska detaljer kring programmering och uppbyggnad av modellen samt en användarguide har tagits fram av ITM (Bilaga 2). Modellen finns nedladdningsbar via ITM:s hemsida på Stockholms Universitet ([www.itm.su.se](http://www.itm.su.se)). Vid användning av modellen måste datorns internationella inställning vara engelska (USA).

Ingångsvärden som beskriver emissioner och halter i miljön ligger i textfiler som läses in i modellen när ett scenario ska sättas upp. Simuleringsresultat genereras både i tabeller och enklare grafer. Resultaten kan även sparas i textfiler som importeras till Excel för vidare bearbetning av data.

### 8.2 Att sätta upp ett scenario

Här ges endast en kortare sammanfattning över hur man sätter upp ett scenario i POP Cycling-Bråviken. Samtliga menyer som omnämns återfinns under huvudmenyn *Define scenario* som man hittar direkt när man öppnar programmet.

### Steg 1: Välja kemikalie

POP Cycling-Bråviken innehåller för närvarande en databas som inkluderar 2,3,7,8-klorerade dioxiner (PCDD/F), hexaklorbensen (HCB), lindan (HCH) och PCB<sub>7</sub> (PCB-28, PCB-52, PCB-101, PCB-118, PCB-138, PCB-153 och PCB-180). Databasen innehåller uppgifter om ämnens fysikaliska-kemiska egenskaper, vilka beskriver hur föroreningarna sprids, fördelas och bryts ned i miljön (Figur 11).

**Edit Chemical Properties**

Chemical Name: **PCB-28** Molecular mass (g/mol): **257.54** Toxic equivalency factor: **1**

**Equilibrium Partitioning between Air, Water and Octanol**

Partition Coefficients at 25°C (dimensionless)

- ☒ log K<sub>aw</sub> + log K<sub>ow</sub> log K<sub>ow</sub>: **5.67**
- ☐ log K<sub>aw</sub> + log K<sub>oa</sub> log K<sub>aw</sub>: **-1.93**
- ☐ log K<sub>ow</sub> + log K<sub>oa</sub> log K<sub>oa</sub>: **7.6**

Heats of Phase Transfer in J/mol

- ☒ dH<sub>aw</sub> and dH<sub>ow</sub> dH<sub>ow</sub>: **-21000**
- ☐ dH<sub>aw</sub> and dH<sub>oa</sub> dH<sub>aw</sub>: **61800**
- ☐ dH<sub>ow</sub> and dH<sub>oa</sub> dH<sub>oa</sub>: **-82800**

**Degradation Half-Lives**

|                            | Air             | Water                                                                                    | Sediment     |
|----------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| half-life at 25°C in h     |                 | <b>5500</b>                                                                              | <b>17000</b> |
| activation energy in J/mol | <b>10000</b>    | <b>30000</b>                                                                             | <b>30000</b> |
|                            | <b>1.04E-12</b> | reaction rate of vapor phase chemical with OH radicals in cm <sup>3</sup> /(molecules.s) |              |

**DB Operations**

**New Chemical**

Save Save As Delete

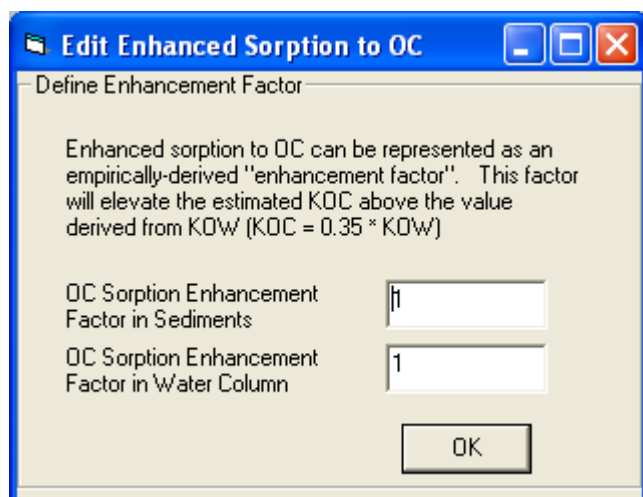
Print Help Cancel OK

Figur 11. Meny för att välja eller lägga till kemikalier i modellens databas.

Nya föroreningar kan läggas in och sparas av användaren. Eftersom man bara kan välja en kemikalie i taget är det vid simulering av PCB<sub>7</sub> nödvändigt att göra 7 separata simuleringar, en för varje kongen som ingår i summaparametern. Resultaten från de 7 simuleringarna måste sedan summeras till PCB<sub>7</sub> i t.ex. Excel. För att övriga menyer under *Define Scenario* ska bli tillgängliga måste man ha valt en kemikalie att arbeta med.

### Steg 2: Förstärkt adsorption till organiskt kol

Under menyn för *Enhanced adsorption to OC* (Figur 12) kan man välja om föroreningarna ska ha en förstärkt bindning till sotpartiklar (s.k. black carbon). Denna typ av bindning är relevant för organiska föroreningar som har en plan molekylstruktur, t.ex. PCB-28 och PCB 118 men även vissa PAH.

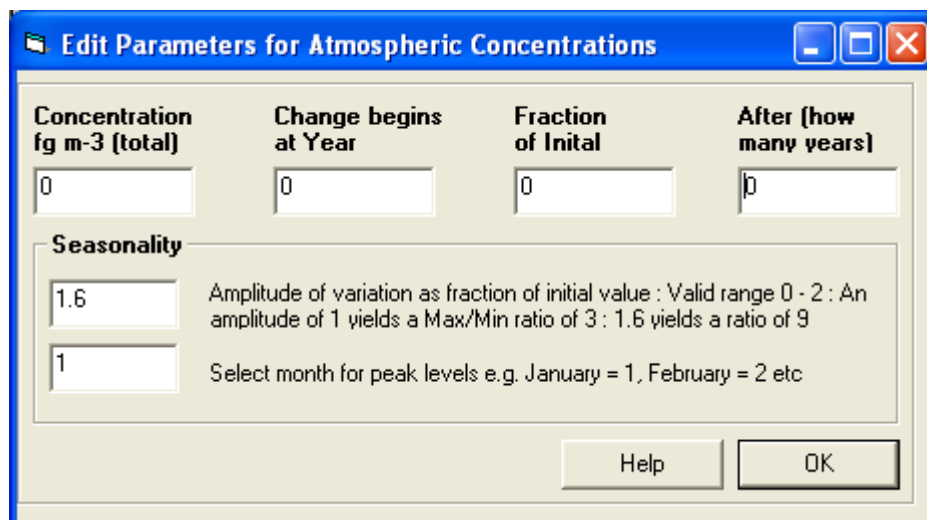


Figur 12. Meny för att definiera förstärkt adsorption till organiskt kol.

Huruvida denna typ av bindning föreligger eller inte kan avgöras baserat på empiriska data (se t.ex. NV, 5912). I fallet Bråviken saknas information om denna bindningstyp är aktuell. Simuleringarna har därför gjorts genom att ansätta värdena "1", vilket innebär att föroreningarna inte har en förstärkt bindning till organiskt kol. Oavsett om funktionen ska användas i modelleringen eller inte måste man gå in i menyn och klicka på OK för att övriga menyer under *Define scenario* ska öppnas.

### Steg 3: Bakgrundshalter i luft

Bakgrundshalter i luft kan inkluderas genom att ange halter baserade på t.ex. empiriska data (Figur 13). I brist på platsspecifik information kan nationella eller internationella data användas om dessa betraktas som representativa för det område man modellerar. För t.ex. PCB har IVL utfört mätningar vid stationer i både Sverige och Finland och dessa data har använts i projektet. Om man anser att luftens innehåll av föroreningar är försumbart kan man sätta "0" i alla rutor.

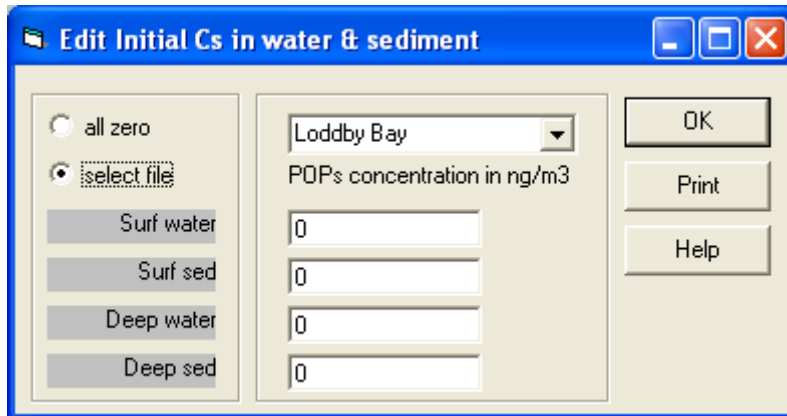


Figur 13. Meny för att ansätta bakgrundshalter i luften.



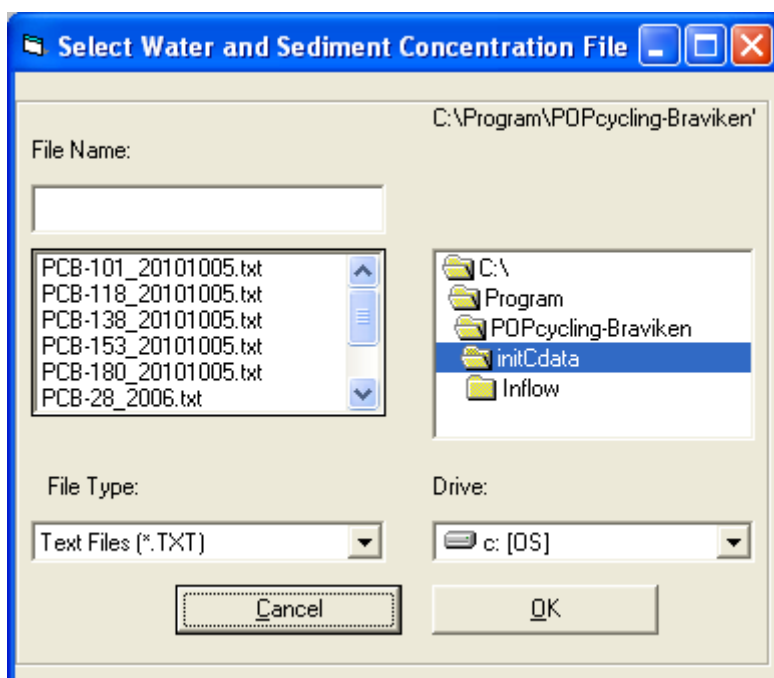
#### Steg 4: Initiala koncentrationer i sediment och vatten

I denna meny definierar man initiala koncentrationer i vatten och sediment i Bråviken (Figur 14). Detta kan göras på tre olika sätt: antingen genom att välja *All zero*, *Select file*, eller genom att manuellt skriva in halterna för respektive område genom att välja område i rullistan och använda de fyra tomma raderna.



Figur 14. Meny med tre olika alternativ för att ansätta initiala koncentrationer i vatten och sediment.

*All zero* väljs om man avser att utföra en simulering där miljön inte innehåller några föroreningar från början men där den får ta emot t.ex. tillfälliga punktutsläpp (se Steg 6). *Select File* är det smidigaste alternativet om man avser att göra upprepade simuleringar för flera scenarier där varje scenario innehåller en uppsättning empiriska mätvärden. Mätvärdena samlas i textfiler som laddas upp genom *Select file* (Figur 15).



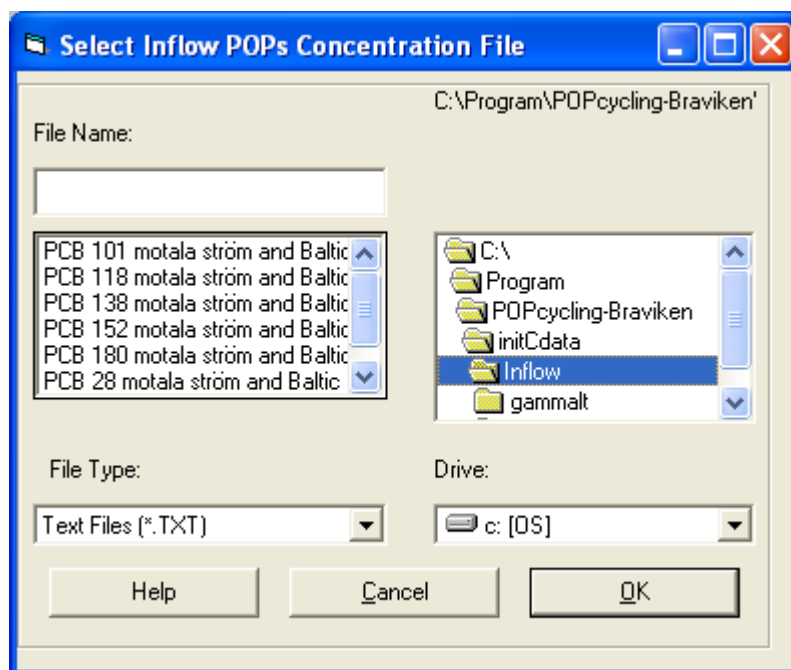
*Figur 15. Väljer man "Select file" öppnas en undermeny där användaren kan välja bland textfiler som innehåller platsspecifika data.*

Hur man skapar textfiler till modellen med hjälp av Excel och Notepad framgår i Bilaga 2. Ska man simulera PCB<sub>7</sub> måste man skapa 7 olika textfiler, en för varje kongen.

#### *Steg 5: Tillskott av föroreningar från tillrinnande ytvatten*

Utöver bakgrundshalter i luft och initiala koncentrationer i vatten och sediment kan föroreningar tillföras Bråviken genom tillskott från ytvatten som mynnar i viken. Inströmmande Östersjövatten bidrar också med en bakgrundsbelastning. Det största sötvattenflödet står Motala Ström för och det vattendraget mynnar i Pampusfjärden. Andra modellregioner som mottar tillrinnande sötvatten är Svensksundsviken, Mellersta Bråviken, Ållonöfjärden, Yttre och Bråviken (se t.ex. Figur 10). I projektet har bidraget från de mindre tillflödena exkluderats.

Tillskottet av föroreningar från ytvatten och Östersjön importeras till scenariot genom textfiler som skapats av användaren (Figur 16, se Bilaga 2 för skapandet av textfilen).

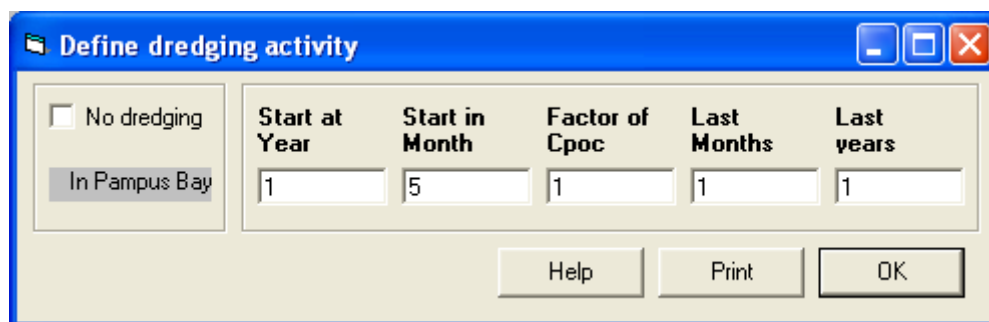


*Figur 16. Meny för att välja textfil som beskriver tillskott av föroreningar från tillrinnande ytvatten samt Östersjön.*

Observera att tillskottet av föroreningar anges i kg/år, vilket innebär att uppmätta halter måste multipliceras med vattenflödet för att data ska få rätt format i textfilen. Empiriska data för ytvatten finns både för Motala ström och för Östersjön. I Motala ström har mätningar utförts med hjälp av passiva provtagare år 2006. Eftersom passiva provtagare endast fångar den biotillgängliga fraktionen av PCB i vatten innebär detta att den totala mängden PCB som tillförs Bråviken genom Motala Ström kan underskattats när dessa data använts i simuleringen. SMHI har tillhandahållit data för vattenflöden som mynnar i Bråviken.

### Steg 6: Ange muddringsaktivitet

Längst in i Bråviken ligger Norrköpings hamn som rensuddras vart 15:e år. Under 2010 har en mer omfattande muddring genomförts för att bredda och fördjupa kanalen genom Pampusfjärden. För att undersöka hur en förhöjd partikelhalt i vattnet påverkar systemet har modellen försetts med en meny där användaren kan inkludera en simulerad effekt av muddringen (Figur 17).



| Start at Year | Start in Month | Factor of Cpoc | Last Months | Last years |
|---------------|----------------|----------------|-------------|------------|
| 1             | 5              | 1              | 1           | 1          |

Figur 17. Meny för att definiera i vilken omfattning som muddring sker i Pampusfjärden och graden av effekt på vattnets innehåll av organiskt kol som aktiviteten leder till.

Effekten beskrivs genom en ökning av halten organiskt kol i vattenfasen (Cpoc). Genom att ansätta faktorn 1 i Figur 17 beskriver man en situation där ingen förändring sker. Sätter man faktorn till 2 simuleras en situation där halten organiskt kol fördubblas. Det bör observeras att effekten av muddringen beskrivs på ett starkt förenklat sätt i modellen då man antar att ökningen blir lika stor i hela systemet. I verkligheten förväntar man sig att påverkan är som störst i de inre delarna och att effekten blir mindre ju längre ut mot kusten man kommer.

### Steg 7: Tillfälliga emissioner

Även om projektets frågeställning inte avsett att studera vad som händer om tillfälliga punktutsläpp sker i systemet innehåller POP-Cycling Bråviken en meny där sådana kan definieras (Figur 18).

**Define Emission Scenario**

**Area:** Loddbay Bay

**Specifying a Scaling Factor**  
the annual release rates read from the file are multiplied with this factor: 1

**Seasonality of the Emissions**

amplitude as fraction of mean: 0  
month of maximum emission: JAN

**Specifying an emission data**  
reading annual emission rates for both air and surf water (t/year)  
Select File

**Air**

scaling factor: 1  
amplitude as fraction of mean: 1  
month of maximum emission: 1

☒ No emits

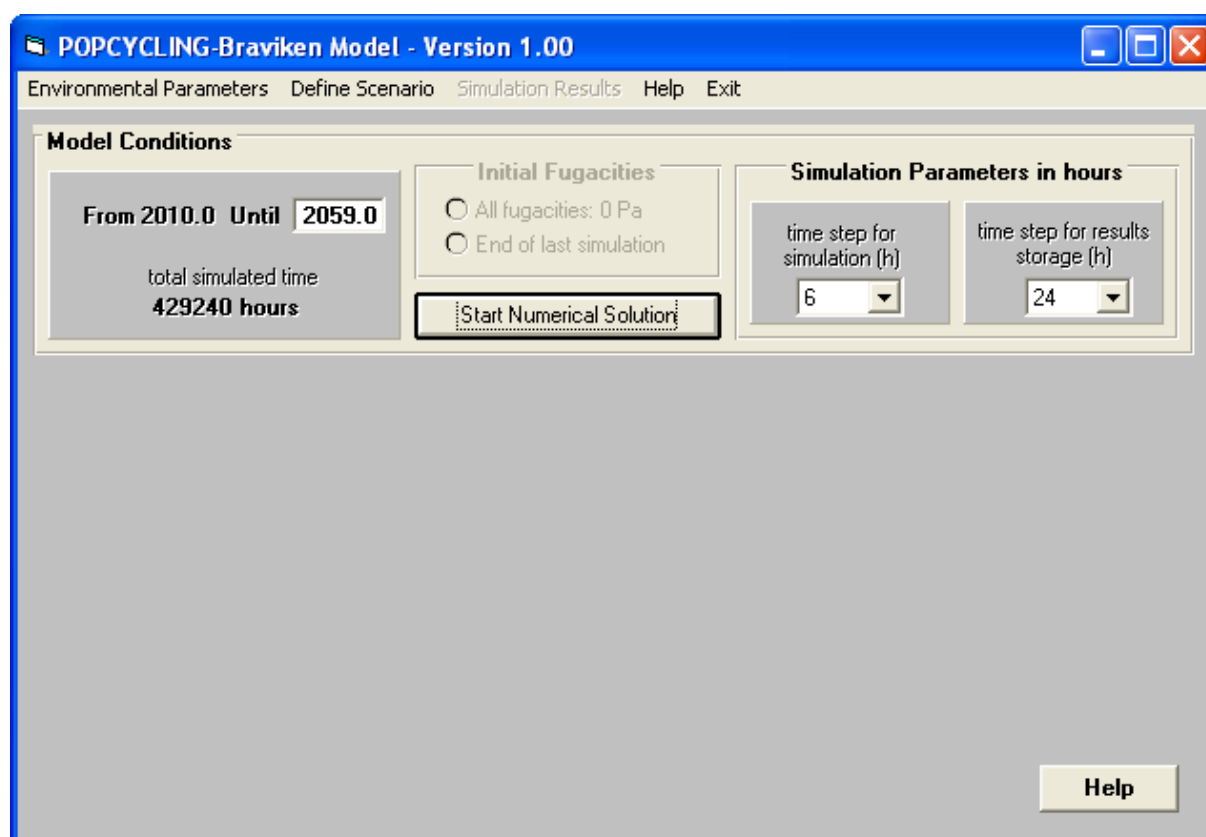
OK  
Print  
Help

Figur 18. Meny för att definiera tillfälliga emissioner av föroreningar i systemet.

Genom att välja *No emits* simuleras en situation där tillfälliga utsläpp inte förekommer. I vissa applikationer, t.ex. om man vill undersöka vad som händer om luft- eller vattenemissioner sker vid en stor olycka, kan funktionerna i menyn vara användbara.

#### Steg 8: Definiera simuleringens längd

När steg 1-7 har genomförts laddas ett fönster automatiskt upp där användaren anger simuleringens längd (Figur 19).



Figur 19. Fönster för val av simuleringens längd.

Observera att startåret för simuleringen automatiskt blir det startår som angetts i textfilen som innehåller data för tillskott från tillrinnande vattenflöden i steg 5 (se även Bilaga 2 för en beskrivning av textfilens innehåll). Slutåret anges också automatisk till slutåret som angetts i ovan nämnda textfil, men det kan även ändras manuellt direkt i fönstret. Simuleringen kan aldrig göras längre än vad tidsintervallet i textfilen tillåter. Exemplet i Figur 19 är baserat på ett scenario där textfilen innehåller tillskottet av föroreningar från tillrinnande vatten från 2010 och 50 år framåt.

### 8.3 Att spara och använda resultatfiler

När simuleringen är klar öppnas en ny huvudmeny bredvid *Define Scenario* som heter *Simulation results*. I undermenyerna finns det flera olika alternativ för hur data ska presenteras. Det mest flexibla sättet är att använda alternativet *Write results to files*, vilket innebär att en rad textfiler skapas som innehåller modellresultaten (Figur 20). I Bilaga 3 ges en förteckning över vilka filer som skapas och vilka data de innehåller.

**POPCYCLING-Braviken Model - Output Results**

**Concentrations**

name of file

☒ atmosphere CA.txt

☒ water CW.txt

☒ sediments CS.txt

**Write to File**

**Fugacities**

name of file

☒ atmosphere FA.txt

☒ water FW.txt

☒ sediments FS.txt

**Write to File**

**Fluxes / Inventories**

**Write to File** Text files with fluxes in kg h<sup>-1</sup> and amounts in kg

**SUM Concentrations/Fluxes**

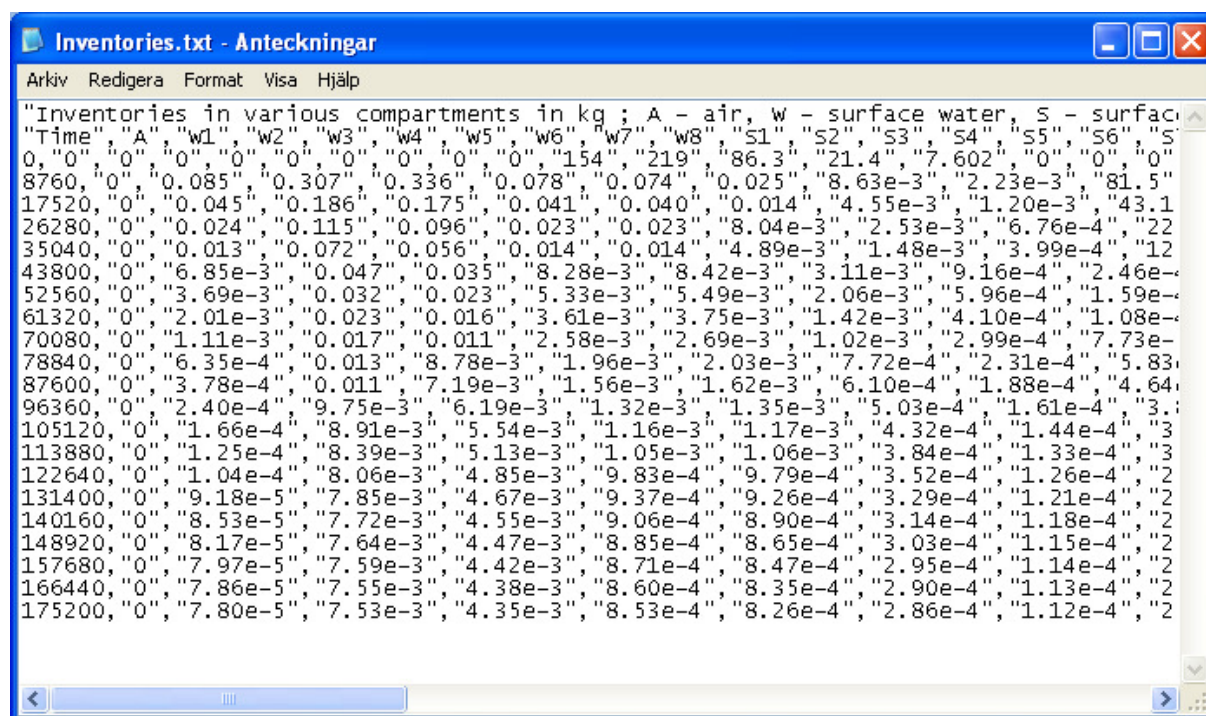
**Write to File** Output SUM of all simulations

**Back**

Figur 20. Meny för att spara ned resultatfiler från simuleringen.

Samtliga resultatfiler som sparas hamnar i mappen *Results* under C:\Program\POPcycling-Braviken\results (om inte programmet installerats under en annan enhet). Eftersom användaren varken kan byta namn på textfilerna eller välja en annan destinationsmapp, måste mappen tömmas efter varje simulering, annars skrivs resultaten över när resultaten från en ny simulering sparas.

Textfilerna som skapas måste importeras i Excel när data ska bearbetas. Utformningen av textfilerna tillåter inte en direkt tolkning av data då filerna är indelade i rader och kolumner som betecknar simuleringsår (rader) och fördelningsrum i modellen (kolumner, se Figur 21)



Figur 21. Exempel på en resultatfil som innehåller total föroreningsmängd (kg) i olika fördelningsrum under simuleringsperiodens samtliga år. Rad "0" är startåret för simuleringen och rad "175200" är slutåret.

Den geografiska tillhörigheten för kolumnerna betecknas med siffran 1 till 8 enligt följande:

- 1= Loddbyviken
- 2=Pampusfjärden
- 3= Inre Bråviken
- 4= Mellersta Bråviken
- 5= Yttre Bråviken
- 6=Bråvikens kustvatten
- 7=Svensksundsviken
- 8= Ållonöfjärden

## 8.4 Hantering av filer

Användaren saknar möjlighet att spara ett scenario som sätts upp. För varje simulering som görs döps dessutom resultatfilerna till samma namn och de sparas alltid i samma destinationsmapp. Detta innebär att steg 1-8 måste gås igenom varje gång en specifik simulering ska upprepas. Därför måste man vara noga med att anteckna vilka indatafiler ett visst scenario bygger på, så att man kan återkonstruera ett scenario vid händelse av omkörning. Mappen *Results* under C:\Program\POPCycling-Braviken\results kan aldrig innehålla resultat från mer än en simulering i taget. Om mappen inte töms efter en simulering kommer resultatfilerna att sparas över då nästa simulering utförs. Det bästa är därför att flytta alla resultatfiler i mappen *Results* till en mapp som innehåller scenariots namn efter varje simulering.



## 9 Resultat för Bråvikens 0-alternativ

### 9.1 Beskrivning av scenario

Scenariot för Bråvikens 0-alternativ simulerar spridning och fördelning av PCB<sub>7</sub> inom systemet under förutsättning att inga åtgärder vidtas mellan 2010 och 2060. Ingångsdata är uppmätta halter i ytliga sediment (Hifab, 2011). Eftersom sedimentdata saknas från kustvattenzonen ansattes den initiala koncentrationen till halva sedimentkoncentrationen i Yttre Bråviken.

För bakgrundshalter i luft har miljöövervakningsdata hämtats från IVL:s databas där ett medelvärde har beräknats för Aspvreten under perioden 2000-2010. Inflödet av PCB<sub>7</sub> från Motala ström har uppskattats till minst 43 g/år genom att använda data från passiv provtagning år 2006. Tillskottet från Östersjön har uppskattats till ca 4 kg/år baserat på mätningar som utförts av Umeå Universitet (opublicerade data). Start- och slutår för simuleringen är 2010 och 2059.

Textfiler med ingångsdata för att göra en simulering av PCB 28 i Bråvikens 0-alternativ är bifogade i Bilaga 5. Observera, för att göra en simulering av PCB<sub>7</sub> behöver varje kongen först simuleras separat, därefter summeras resultaten till PCB<sub>7</sub> i t.ex. Excel.

### 9.2 Mängdfördelning inom Bråviken

Efter det första simuleringsåret (år 2011) har PCB<sub>7</sub> fördelat sig inom systemet enligt Tabell 5. Den huvudsakliga källan är de ytliga sedimenten där mängderna är 100-1000 gånger högre jämfört med mängderna i vattenfasen och atmosfären. Mängden PCB styrs till stor del av hur stor area som delområdena täcker.

Tabell 5. Uppskattad total mängd PCB<sub>7</sub> (kg) i Bråvikens fördelningsrum år 2011.

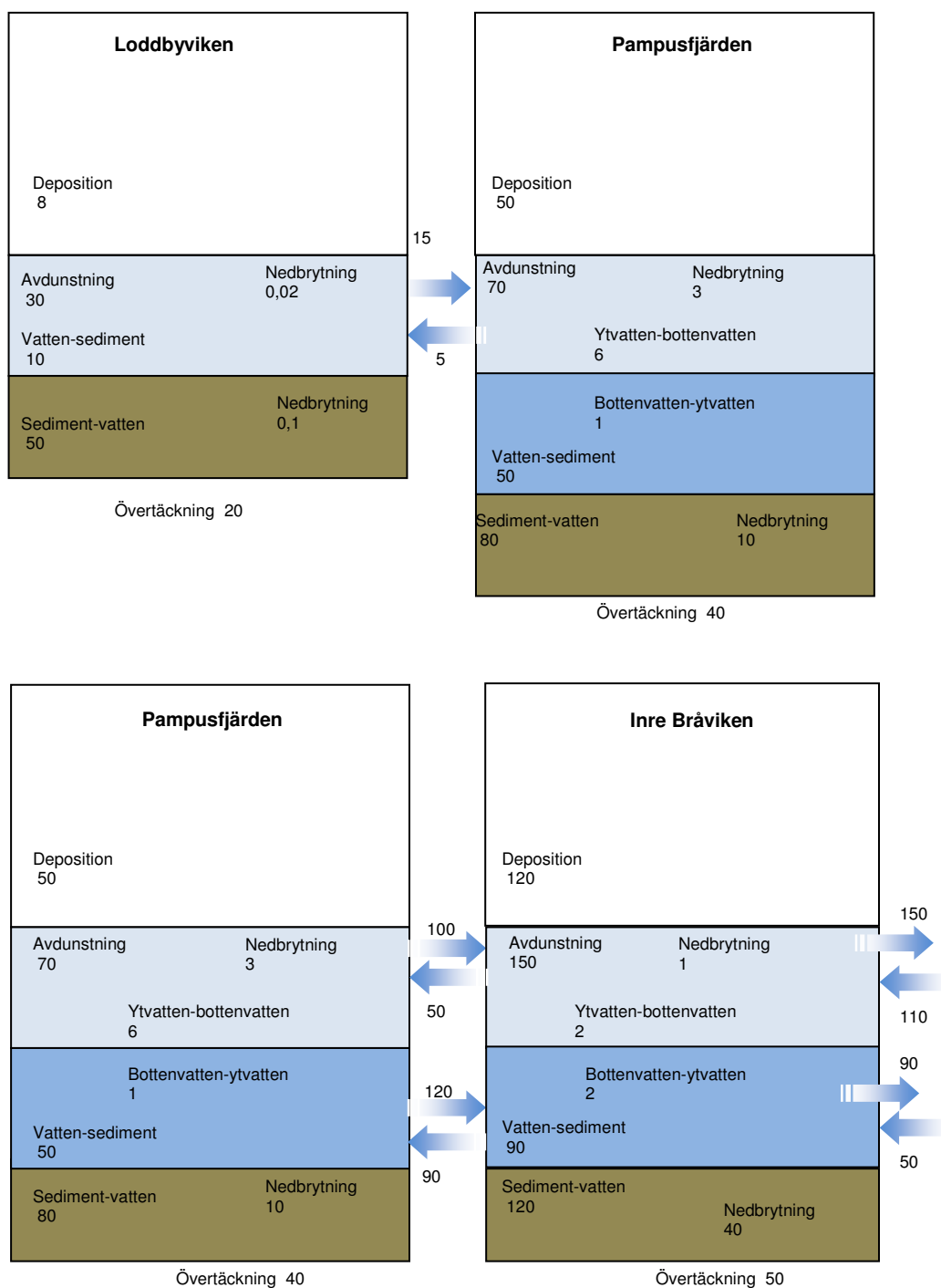
| <i>Mängd PCB<sub>7</sub> (kg)</i> | <i>Loddbyviken</i> | <i>Pampusfjärden</i> | <i>Inre Bråviken</i> | <i>Mellersta Bråviken</i> | <i>Yttre Bråviken</i> | <i>Bråvikens kustvatten</i> |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>Ytvatten</i>                   | 0,00020            | 0,0016               | 0,0033               | 0,0012                    | 0,0034                | 0, 031                      |
| <i>Bottenvatten</i>               | -                  | 0,00078              | 0,0018               | 0,00084                   | 0,0031                | 0, 029                      |
| <i>Ytsediment (0-5 cm)</i>        | 0,33               | 0,97                 | 1,8                  | 0,22                      | 0,97                  | 0,47                        |
| <i>Luft</i>                       | 0,04               |                      |                      |                           |                       |                             |

De högsta PCB-halterna i Bråvikens ytsediment har mätts upp i Loddbyviken. Området innehåller dock endast 7 % av den totala mängden PCB<sub>7</sub> i ytsedimenten då Loddbyviken utgör en mindre andel (ca 0,4 %) av Bråvikens totala area. I Pampusfjärden och inre Bråviken återfinns ca 20 % och 40 % av den totala mängden PCB<sub>7</sub>. Dessa ytor täcker tillsammans ca 10

% av Bråviken. Mellersta och Yttre Bråviken samt Bråvikens kustvatten utgör tillsammans ca 90 % av ytan och innehåller ca 30 % av det totala innehållet av PCB<sub>7</sub> i ytsedimenten.

### **9.3 Massflöden i de inre delarna**

Simulerade massflöden visar på vilka transportvägar som styr spridning och fördelning av PCB<sub>7</sub> inom och mellan olika matriser/delområden. Massflödena för Pampusfjärden och Inre Bråviken under simuleringsåret 2011 redovisas i Figur 22. En komplett redovisning av simulerade massflöden för samtliga områden återfinns i Bilaga 4.



Figur 22. Massflöden av PCB<sub>7</sub> (g/år) i Pampusfjärden och Inre Bråviken år 2011.

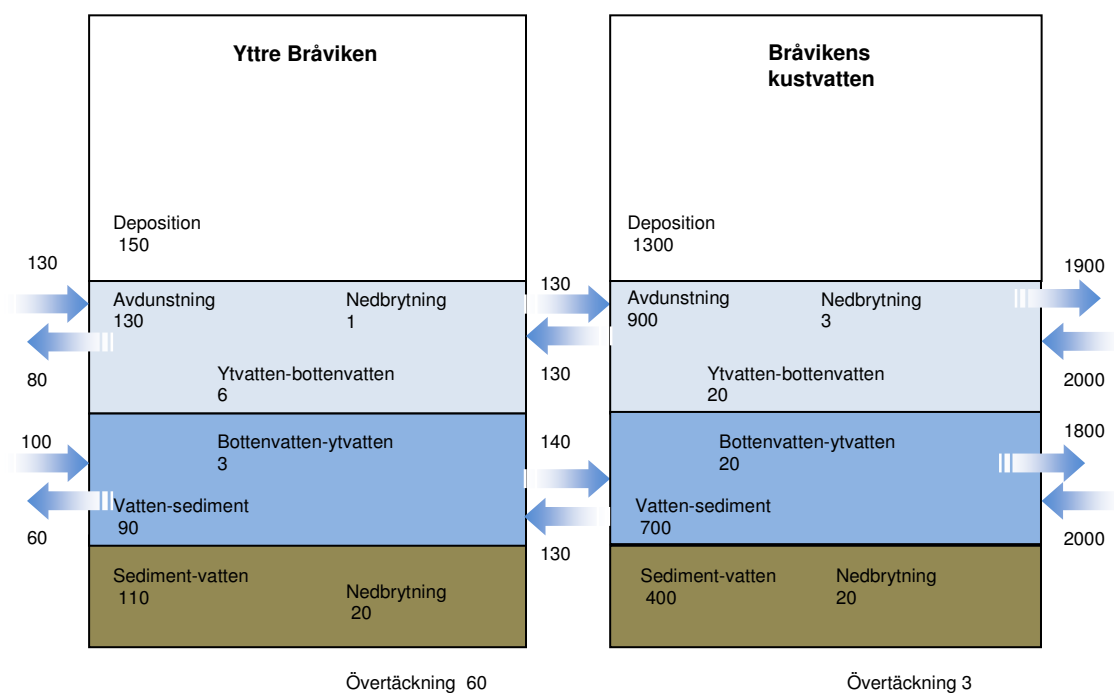
Massflödena visar att spridning från sedimenten utgör ett av de största enskilda flödena inom Loddbyviken, Pampusfjärden och Inre Bråviken. I Pampusfjärden mynnar även Motala Ström vars årstransport av PCB<sub>7</sub> uppskattats till minst 43 g/år genom mätning med passiv provtagning. Eftersom provtagningsmetoden endast mäter den biotillgängliga fraktionen bör det totala flödet vara något större. Uppskattningsvis kan Motala Ström bidra med ett lika stort PCB-flöde som sedimenten i Pampusfjärden (ca 80 g/år). Loddbyviken utgör sannolikt inte en

signifikant källa till Pampusfjärden då transporten på 15 g/år står för ett betydligt mindre flöde än Pampusfjärdens sediment som bidrar med 80 g/år. Grundvattenmätningar från utfyllda industriområden visar att tillskottet av PCB via förorenade grundvattenakvifärer sannolikt är en mindre källa (årligt flöde uppskattat till ca 6-7 g/år, SGI, 2010).

Atmosfärisk deposition räknas ofta som en huvudsaklig källa i bakgrundsbelastade områden. De simulerade massflödena visar dock att det nettoflödet mellan luft och ytvatten är riktat mot atmosfären, vilket innebär att vattnet i de inre delarna är en källa och atmosfären en sänka. Det låga utbytet av PCB mellan djupvatten och ytvatten indikerar dock att PCB som härrör från de förorenade sedimenten försvinner från systemet genom horisontell transport och inte genom avdunstning från ytvattnet. Nettobidraget från de förorenade sedimenten tycks i huvudsak föras bort från systemet genom transport mot de yttre delarna. Övertäckning av sediment kan i storleksordning svara mot nettobidraget från de förorenade sedimenten.

#### 9.4 Massflöden i de yttre delarna

Simulerade massflöden för Yttre Bråviken och Bråvikens kustvatten år 2011 redovisas i Figur 23.



Figur 23. Massflöden av PCB<sub>7</sub> (g/år) i Yttre Bråviken och Bråvikens kustvatten år 2011.

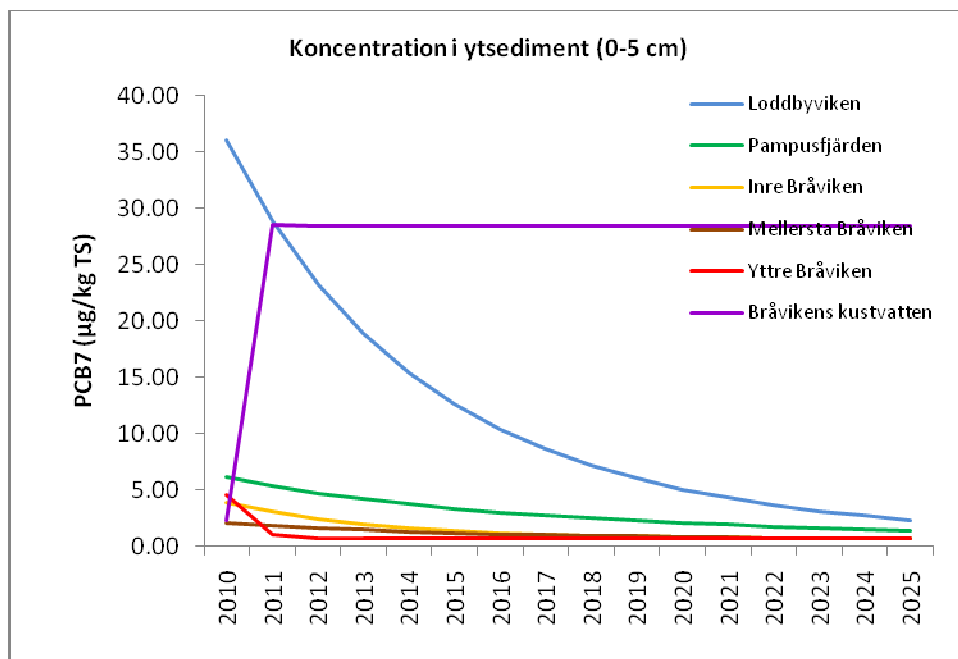
Det största flödet inom Yttre Bråviken och Bråvikens kustvatten kommer från atmosfärisk deposition, vilket indikerar att vattnet i Bråvikens yttre del är en sänka. Detta stämmer med resultat från simulering av PCB i Östersjön där atmosfären identifierats som huvudsaklig källa (NV 5219). Sedimenten utgör inte en lika tydlig källa som i de inre delarna. Tvärtom förväntas sedimenten i kustzonen fungera som en sänka. Inflödande vatten från Östersjön bidrar med ett bakgrundsflöde av PCB som storleksmässigt överskrider de andra massflödena.

Summeras de horisontella flödena i väst-östlig (från Bråviken och ut mot Östersjön) och öst-västlig riktning finns ett nettoöverskott riktat in mot Bråviken på ca 0,1 kg/år. Detta resultat beror främst på en hög belastning i kustzonen som kommer från Östersjön. Om utbytet mellan kustzonen och Östersjön exkluderas sker en nettotransport i väst-östlig riktning på ca 0,3 kg, vilket innebär att PCB transporteras ut mot Bråvikens yttre delar.

## 9.5 Haltförändringar över tid

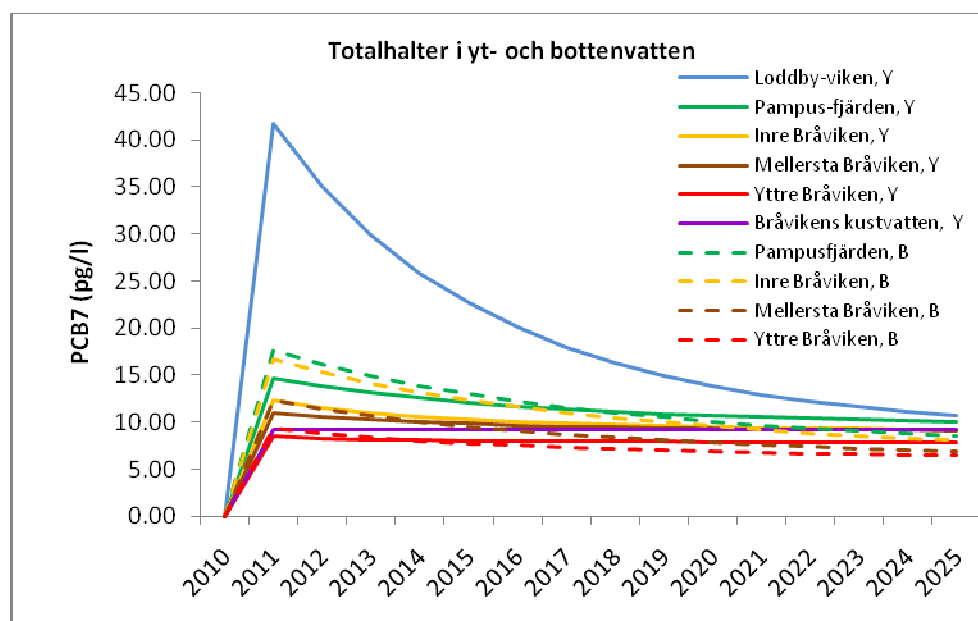
Den predikterade haltförändringen i Bråvikens ytliga sediment över tid redovisas i Figur 24. Den naturliga återhämtningen är som störst i Loddbyviken som idag innehåller ca 10 gånger högre halter jämfört med övriga områden. Modellen predikterar att halterna sjunker med en hastighet som innebär att skillnaden har jämnats ut inom loppet av 10-20 år. För övriga områden är ingen större haltförändring att förvänta. På 10-20 års sikt förväntas halterna i Pampusfjärden ha reducerats med endast 50 %. De kommer då att motsvara dagens PCB-halter i Bråvikens ytterområden.

Modellens predikterar en markant haltökning i kustvattenzonen. Fenomenet kan eventuellt förklaras med att Östersjön har något avvikande fysiska-kemiska egenskaper jämfört med sediment i sötvattenmiljöer. Detta har tagits hänsyn till i modellen och denna parameterisering tycks medföra att PCB i ytsedimenten kommer att ackumuleras i oväntat höga utsträckning. Resultatet bedöms inte som en realistisk återspeglning av PCB-halter i kustzonen.



Figur 24. Modellerade halter PCB<sub>7</sub> (µg/kg TS) i sediment mellan 2010 och 2025.

Den predikterade haltförändringen av PCB<sub>7</sub> i vattnet redovisas i Figur 25. Under det första simuleringsåret sker en omfördelning från källorna (sediment, bakgrundsinflöde från Motala ström och Östersjön samt atmosfären) till vattnet, vilket resulterar i en initial haltökning. I Loddbyviken predikteras förhöjda halter i vattnet som en följd av de förorenade sedimenten.



Figur 25. Modellerade totalhalter PCB<sub>7</sub> (pg/l) i vatten mellan 2010 och 2025. Y=ytvatten, B=bottenvatten.

Bakgrundshalter av PCB<sub>7</sub> i två rinnande sötvatten, en vik till Östersjön och ett Östersjöområde har mätts upp till 9-14 pg/l av Umeå Universitet (opublicerade data). Samtliga mätningar har utförts i områden som representerar opåverkade bakgrundsområden i Sverige. I Naturvårdsverket (2009) återges empiriska data för lösta PCB-halter i Östersjön, vilka ligger kring 4-6 pg/l. Rapporterade totalhalter är 3-44 pg/L.

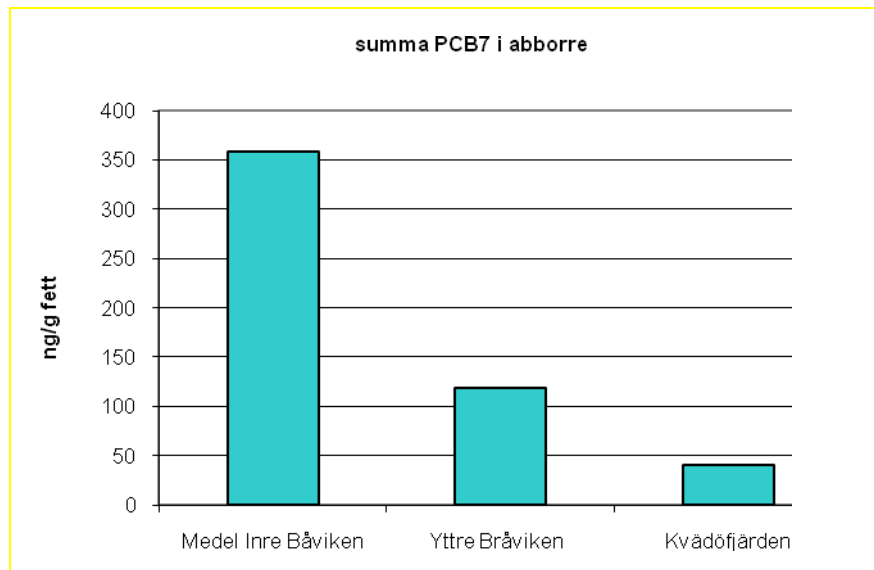
De predikterade vattenkoncentrationerna av PCB i Loddbyviken vid dagens situation är ca 2-3 gånger högre än förväntade bakgrundshalter vilket tolkas som ett rimligt simuleringsresultat med reservation för att det ändå kan vara en underskattning. Under de närmaste årtiondena sker en gradvis sänkning av halterna i Loddbyviken som en respons på att sedimentkoncentrationerna i ytan mattas av. I områden utanför Loddbyviken är de predikterade halterna i nivå med uppmätta bakgrundshalter redan vid dagens situation. Eventuellt kan modellen ha gjort en underskattning då det är sannolikt att Bråvikens vatten är något mer kontaminerat än opåverkade bakgrundsområden. Resultatet tyder dock på att modellen ger en rimlig uppskattning av vattenhalterna.

De inre delarna förväntas ha ca 2 gånger högre vattenkoncentrationer jämfört med de yttre delarna. Över tid förväntas halterna sjunka något men inga större förändringar kommer troligen att ske. Om ca 10-15 år förväntas vattenhalterna vara mer eller mindre lika i hela systemet även om de inre delarna fortfarande kommer att innehålla något högre halter. Systemet stabiliseras kring halter på 6-10 pg/l.

Trots att sedimenten styr innehållet av PCB i vattnet och det sker ett litet vertikalt utbyte mellan vattenmassorna är haltskillnaderna mellan ytligt vatten och bottenvatten marginella.

## 9.6 Utvärdering av modelleringsresultat mot uppmätta halter i fisk

PCB<sub>7</sub> i abborre från Bråviken har analyserats vid två tillfällen. Under 2007 analyserades tre samlingsprover (15 individer i varje samlingsprov) från olika delar i inre Bråviken (Norra Svindra samt Södra och Norra Esterön). Som en del av föreliggande projekt analyserades ett samlingsprov (15 individer) från den yttre delen (Lönö) under 2010. Under 2005 och 2006 analyserades PCB<sub>7</sub> i abborre från Kvädöfjärden, ett referensområde som ingår i den nationella miljöövervakningen. Figur 26 sammanställer resultaten från de tre analystillfällena.



Figur 26. Uppmätta halter PCB<sub>7</sub> (ng/g fett) i abborre från Inre Bråviken, Yttre Bråviken och Kvädöfjärden (referensområde som ingår i nationell miljöövervakning).

Abborre från de inre delarna innehåller ca 3 gånger högre halter jämfört med abborre från de yttre delarna. Jämfört med Kvädöfjärden är halterna i de inre delarna ca 6-7 gånger högre. Även abborre från Bråvikens yttre delar innehåller ca 2-3 gånger högre halter än abborre från Kvädöfjärden. Resultaten visar att abborrarna utsätts för en förhöjd exponering i de inre delarna. Exponeringen kan både vara relaterad till förhöjd halter i sediment som ackumuleras genom födokedjan och förhöjda halter i ytvattnet som ackumuleras i fisken genom biokonzentrering. Att båda exponeringsvägarna är möjliga stöds av sedimentanalyser och predikterade halter i vattenfasen. Haltskillnaderna i fisk från inre och yttre Bråviken svarar mot haltskillnaderna i sediment respektive ytvatten från respektive område.

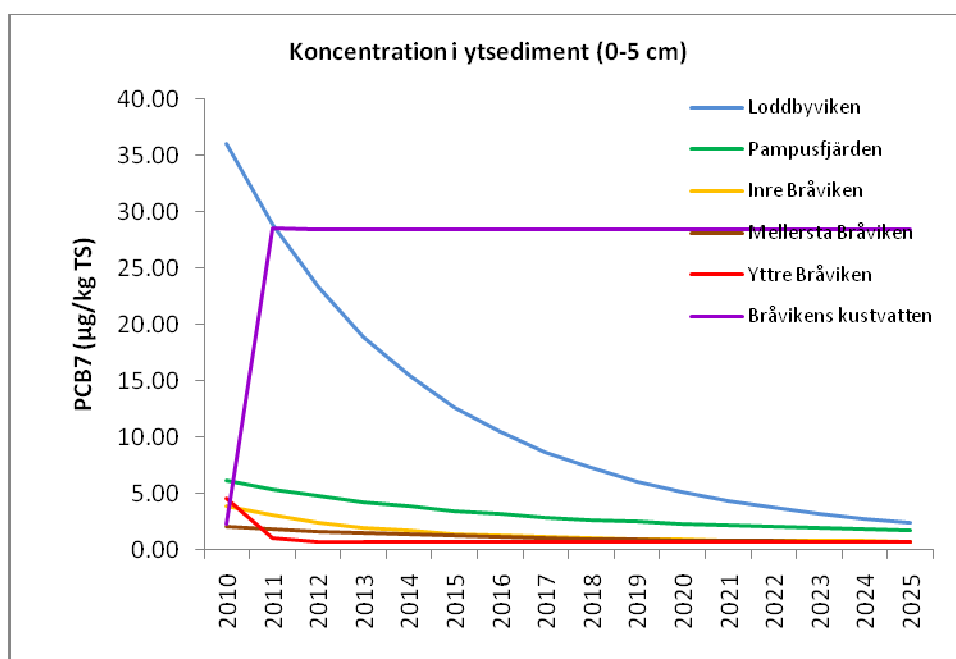
I takt med att Bråvikens PCB-halter sjunker kommer även halterna i fisken att sjunka. Tidigare studier har visat att halter av POPs (persistenta organiska miljögifter, t.ex. PCB och dioxin) i pelagiska fiskar är linjärt korrelerade mot den lösta halten i vatten (NV, 2009). Eftersom PCB-halterna i vatten i Bråvikens inre delar styrs av sedimenten kommer haltminskningen i fisk vara beroende av sedimentens återhämtningstid. Det faktum att abborre i de yttre delarna innehåller något förhöjda halter i förhållande till ett opåverkat referensområde indikerar att det finns en lokal bakgrundsbelastning som är förhöjd. Sannolikt kommer fisk från de inre delarna även i framtiden att uppvisa något förhöjda halter även om effekten från de förorenade sedimenten kommer att avklinga.



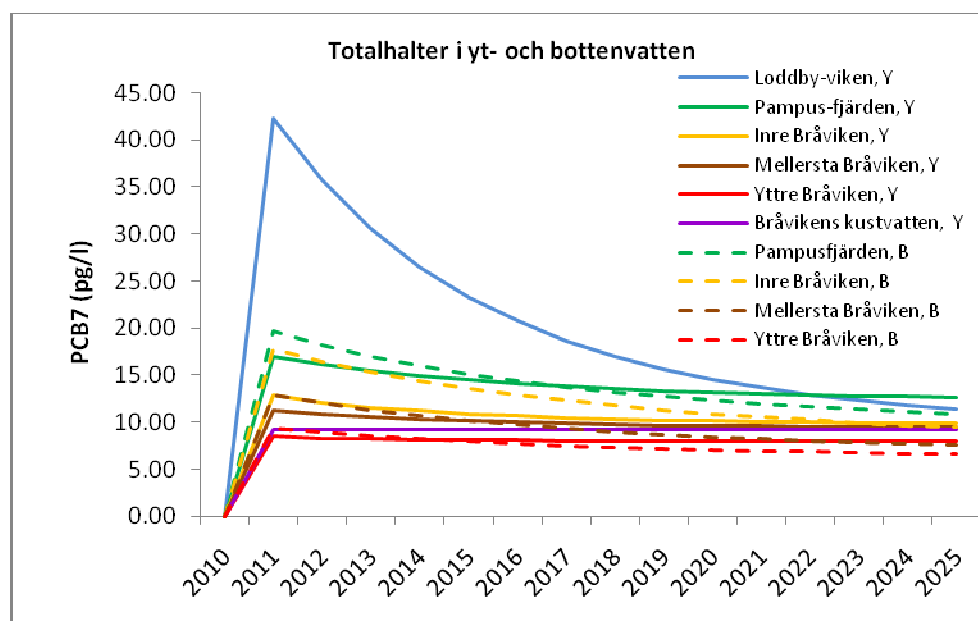
## 9.7 Systemförändringar kopplade till belastning från Motala ström

I simuleringen av 0-alternativet användes ett årligt inflöde på 43 g/år via Motala ström. Eftersom uppskattningen är baserad på data från passiv provtagning, som endast tar hänsyn till den biotillgängliga fraktionen, kan det totala bidraget ha underskattats. En kompletterande simulering kördes därför med ett bidrag på 86 g/år från Motala Ström. Resultaten redovisas i Figur 27 och Figur 28.

Ett högre bidrag från Motala ström har en marginell inverkan både på sediment- och vattenkoncentrationerna och påverkar inte återhämtningstiderna. Bråvikens sedimentkoncentrationer och sedimentdynamik är därmed mer avgörande för PCB-balansen än inflödet från Motala ström.

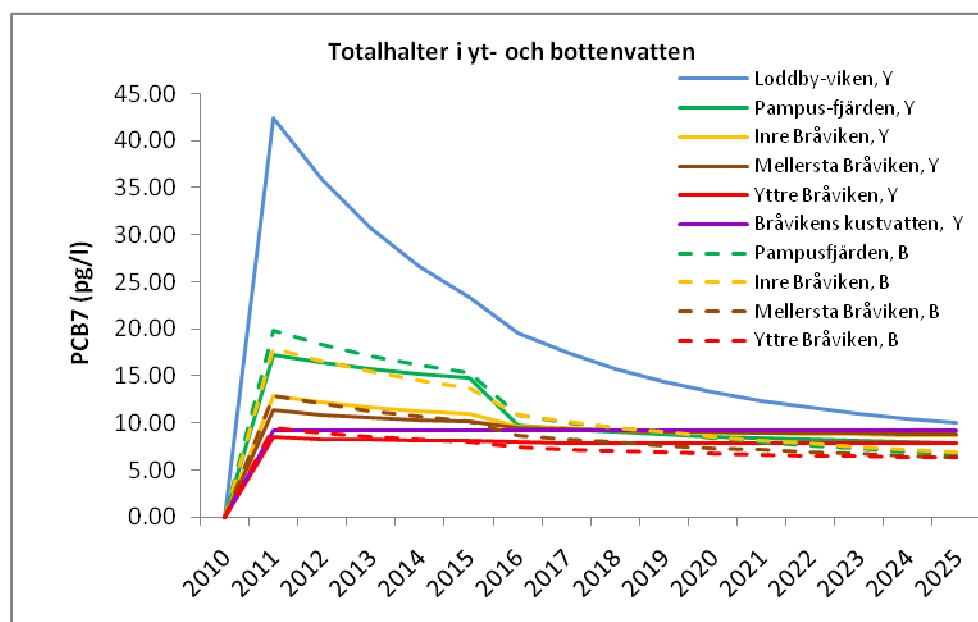


Figur 27. Modellerade halter PCB<sub>7</sub> (µg/kg TS) i sediment mellan 2010 och 2025 om bidraget från Motala ström uppgår till 86 g/år. Y=ytvatten, B=bottenvatten.



Figur 28. Modellerade totalhalter PCB<sub>7</sub> (pg/l) i vatten mellan 2010 och 2025 om bidraget från Motala ström uppgår till 86 g/år. Y=ytvatten, B=bottenvatten.

Eftersom den passiva provtagningen visar att halterna i Motala ström är minst 10 gånger högre än bakgrundshalterna i opåverkade vattendrag (opublicerade data från Umeå Universitet), gjordes ytterligare en uppföljande simulering där bidraget från Motala ström reducerades från 86 till 8,6 g/år från år 2015. Åtgärden medför att systemet stabiliseras kring halter på 5-8 pg/l, vilket motsvarar resultatet för 0-alternativet (se Figur 25), den enda skillnaden är att återhämtningen sker snabbare. Åtgärden hade ingen effekt på haltförändringar i sedimenten.



Figur 29. Modellerade totalhalter PCB<sub>7</sub> (pg/l) i vatten mellan 2010 och 2025 om bidraget från Motala ström reduceras med 90 % från och med år 2015. Y=ytvatten, B=bottenvatten.

## 10 Slutsatser om källor och åtgärder i Bråviken

### 10.1 Sammanvägd bedömning av empiriska data och modellresultat

Sedimentanalyser (0-2 cm) visar att PCB-halter på 33-39 ng/g TS PCB förekommer i Loddbyviken (Hifab 2011). Jämfört med Bråvikens ytterområden är halten ca 10 gånger högre. I anslutande område Pampusfjärden varierade halterna mellan 5-8 ng/g TS, vilket är ca 2-3 gånger högre jämfört med sediment från Bråvikens ytterområden. PCB-analyser på sediment från Bråviken har även utförts före 2010, men resultaten från olika undersökningstillfällen har inte befunnits jämförbara då proverna har tagits på olika djup och analyserna har haft olika detektionsgränser. Från sedimentundersökningar år 2008 tycks det dock som att PCB främst förekommer i de översta 10 centimetrarna (Hifab, 2009).

Modellering av massflöden visar att sedimenten är den huvudsakliga källan till PCB i vattenfasen i de inre delarna. En mindre bidragande källa är Motala ström medan atmosfärisk deposition inte ger ett betydande tillskott av PCB. Grundvattenmätningar i utfyllda industriområden visar att ca 6-7 g PCB kan läcka ut årligen i den inre delen (SGI, 2010). Jämfört med bidraget från förorenade sediment är detta tillskott inte särskilt betydelsefullt. I Bråvikens yttre delar kommer det huvudsakliga tillskottet av PCB från atmosfären och från Östersjöns bakgrundsbelastning. Loddbyviken i sig tycks inte utgöra en signifikant källa som påverkar Pampusfjärden.

Trots att sedimenten utgör den största källan i de inre delarna är det endast i Loddbyviken som de bidrar till signifikant förhöjda PCB-halter i vattnet (ca 35 pg/l). Bortsett från Loddbyviken är de predikterade vattenkoncentrationerna i de inre delarna endast 2 gånger högre än predikterade halter i de yttre delarna (ca 3-7 pg/l), vilket förklaras med påverkan från förorenade sediment. I Loddbyviken är förhöjningen ännu mer markant då de predikterade halterna är ca 6-7 gånger högre jämfört med ytterområdena. Sett över tid förväntas en tydlig haltminskning ske i Loddbyvikens vatten. I övriga delar kan halterna också komma att minska något med tiden. På ca 20 års sikt förväntas Bråvikens vatten kunna innehålla ca 6-10 pg/l. Referensdata för utvärdering av predikterade halter mot dagens vattenkoncentrationer i Bråviken saknas. Jämfört med uppmätta bakgrundshalter i Östersjön och ytvatten från opåverkade områden bedöms dock simuleringsresultaten som rimliga även om de innehåller vissa osäkerheter.

Analyser av PCB i abborre från inre och yttre Bråviken visar en haltökning på ca 3 gånger i de inre delarna jämfört med de yttre delarna. Den uppmätta haltskillnaden i abborre stämmer med den predikterade haltskillnaden i vattenfasen mellan de inre och yttre delarna i Bråviken (ca 2 gånger). Den ligger även i nivå med den uppmätta haltskillnaden i ytliga sediment mellan inner- och ytterområden (ca 2-3 gånger). Då abborre från de yttre delarna uppvisar något högre halter än abborrar från ett opåverkat referensområde tyder det på en diffus påverkan i hela systemet. De modellerade massflödena visar att det sannolikt finns en nettotransport av PCB (som härrör från sediment) i väst-östlig riktning. Det går dock inte att frångå att Östersjön i sig själv kan utgöra en PCB-källa i de yttre delarna. Bråviken förväntas dock inte medföra en hög, lokal belastning på Östersjön.

### 10.2 Osäkerheter i modelleringen

Modelleringen innehåller en rad osäkerheter som ej kunnat täckas in av föreliggande projekt.

Bråviken har en mycket stor yta och förhållandevis få undersökningar har utförts i området. Kunskap om PCB-halter i vatten saknas och representativa föroreningsnivåer som ingått i modelleringen har beräknats från ett fåtal provpunkter. Från början fanns en ambition att kunna utnyttja resultat från tidigare undersökningar. Vid sammanställningen framgick det att proverna tagits på varierade djup och placeringen av provpunkterna var inte alltid optimal för att beräkna representativa halter för ett större delområde. Noggrannheten i de analyser som utförts har också varierat, vilket innebär att äldre data ofta innehållit halter under detektionsgränsen.

Uppenbara osäkerheter finns i parametrar som beskriver sedimentationsdynamiken där platsspecifika data i stort sett har saknats. Eftersom en känslighetsanalys av modellen ej kunnat genomföras inom projektbudgeten är det osäkert i hur stor utsträckning som dessa parametrar påverkar resultaten. Av erfarenhet vet man dock att sedimentationsdynamiken är betydelsefull för återhämtningen av naturliga system som kontaminerats med hydrofoba ämnen. Hamntrafik och rensmuddring utgör återkommande störningar som kan bidra till att återhämtningen sker långsammare än vad som predikterats. De analyser som utförts visar dock att systemet inte är allvarligt kontaminerat av PCB i dagsläget, även om det finns en tydlig, lokal påverkan från förorenade sediment i de inre delarna.

I hur hög grad som PCB förekommer i djupare sedimentlager är inte kartlagt i denna undersökning. Tidigare analyser visar dock att PCB i huvudsak tycks förekomma i de översta 10 centimetrarna. I modellen har inte bidraget från djupare liggande sediment tagits med. Vid kraftig omrörning, t.ex. som följd av bioturbation och vid rensmuddring, finns det en risk att begravnade föroreningar frisätts och förs ut i vattenfasen och sedimentationscykeln på nytt. Sammantaget finns här en osäkerhet som är relaterad till bristande kunskap om själva systemet.

Länsstyrelsens arbete omfattar fler föroreningar än PCB. Spridning och fördelning av andra föroreningar är sannolikt beroende av andra källor och mekanismer än de som identifierats för PCB.

Resultat från modellen har så långt det varit möjligt utvärderats mot empiriska data för att utvärdera om resultaten varit realistiska eller ej. Eftersom historiska tidsserier saknas har modellen inte kunnat kalibreras genom att göra en s.k. retrospektiv simulering där man försöker återskapa dagens situation genom att utgå från historiska data. Modellen har dock byggts upp med högkvalitativa data gällande t.ex. vattenbalansen medan empiriska data beskriver bakgrundshalter och initiala koncentrationer i miljön. Trots att resultaten är osäkra har de tolkats som realistiska beskrivningar av systemet då jämförelser gjorts mot andra typer av mätdata, t.ex. bakgrundshalter i vatten i opåverkade områden samt halter i fisk från Bråviken. Det faktum att haltskillnaderna i fisk stämmer väl mot predikterade haltskillnader i vatten och uppmätta haltskillnader i sediment tolkas som att spridningen av PCB simulerats på ett realistiskt sätt.

### **10.3 Slutsatser kring åtgärder i Bråviken**

- 1) Vilka källor förväntas påverka föroreningsbelastningen idag och i framtiden om inga åtgärder sätts in

De huvudsakliga PCB-källorna i de inre delarna är förorenade ytsediment. I de yttre delarna är det atmosfären och Östersjön som ger ett stort bidrag. Bidraget från Motala ström är dåligt karakteriserat eftersom endast en mätning med passiv provtagning finns men simuleringen tyder på att ån är en mindre signifikant källa.

Uppenbart förorenade sediment förekommer främst i Loddbyviken, ett område som täcker en mycket liten andel av Bråvikens totala area. Det verkar inte som att PCB-förekomsten i Loddbyviken påverkar belastningen i angränsande Pampusfjärden. PCB-halterna i Pampusfjärdens och Inre Bråvikens sediment är måttligt förhöjda. Ändå tycks sedimenten bidra till en mindre haltökning i vattnet och det finns ett förhöjt upptag av PCB i fisk. Förorenat grundvatten från utfyllnadsområden utgör förmodligen en mindre betydande källa.

2) Vilka mekanismer styr spridningen av föroreningar inom Bråvikens delområden samt ut mot Östersjön

Resuspension av PCB från sediment påverkar sannolikt bottenvattnet i Bråvikens inre delar. Vidare transport sker genom advektiva processer i väst-östlig riktning mot Östersjön. Förmodligen är utbytet mellan vertikalt fördelade vattenskikt marginellt. I ytligt vatten beror PCB-förekomst främst på atmosfärisk deposition. I de yttre delarna är sedimenten förmodligen en sänka snarare än en källa. Övertäckning av sediment i de inre delarna bidrar till att reducera PCB-förekomsten på sikt men kunskapsluckorna kring sedimentationsdynamiken är stora. Storleksordningen på övertäckningsgraden motsvarar i princip huvuddelen av tillskottet från Motala ström.

3) Hur stort flödet av föroreningar är mellan olika medier och mellan olika delar av Bråviken

Motala ström bidrar med uppskattningsvis 40-80 g PCB varje år. Detta kan jämföras mot 6 g PCB som kan komma från förorenat grundvatten. Nettobidraget från Pampusfjärdens och Inre Bråvikens sediment uppgår till ca 70 g/år medan Loddbyvikens sediment bidrar med ca 15 g/år. Övertäckning av sediment reducerar PCB-förekomsten med ca 100 g/år i de inre delarna. Den horisontella nettotransporten av PCB i bottenvattnet som lämnar Inre Bråviken är ca 30 g.

4) Hur lång är den naturliga återhämtningstiden om inga åtgärder utförs

Simuleringen visar att den förväntade återhämtningstiden är ca 10-20 år. Troligen uppstår en tydlig effekt endast i Loddbyviken. I Pampusfjärden och Inre Bråviken är halterna marginellt förhöjda och på 20 års sikt förväntas endast en 50-procentig reduktion av dagens koncentrationer. Även om halterna i miljön förväntas reduceras på 10-20 års sikt kommer biota att uppvisa en längre återhämtningstid. Om de predikterade haltförändringarna i sediment och vatten stämmer kan haltskillnaden mellan fisk från inre och yttre delen förmodligen komma att reduceras på 20-30 års sikt.

5) Var ska eventuella åtgärder sättas in för att ha störst effekt på reduktionen av föroreningar

Karaktären på de huvudsakliga PCB-källorna i de inre delarna medför att effektiva åtgärder kan vara svåra att hitta. Pampusfjärden och Inre Bråviken täcker en stor yta som är svår att åtgärda om man avser att ta bort/täcka över ytsedimenten. Jämförelser av empiriska data och

predikterade halter mellan inre och yttre Bråviken visar att vid en 50-procentig reduktion av PCB-halterna motsvarar föroreningssituationen i de inre delarna yttre Bråviken.

Bedömningen av Bråvikens status avseende PCB enligt Vattendirektivet är främst kopplad till ekologiska risker. För att påskynda haltminskning i biota kan eventuellt behandling av sediment med kol-tillsatser rent teoretisk förväntas reducera biotillgängligheten hos PCB.

Situationen är något annorlunda för Loddbyviken där det finns markant förhöjda PCB-halter i sedimenten och modelleringen visar på en möjlig påverkan på vattenfasen. Området tycks dock inte bidra till belastning av PCB i Bråvikens inre delar. Åtgärder som borttagning/övertäckning förväntas endast ge en lokal effekt och har sannolikt liten betydelse för Bråviken som helhet.

Motala ström är en bidragande källa i de inre delarna men medför liten påverkan jämfört med ytsedimenten. Den totala PCB-halten i ån (>120 pg/l) är flera gånger högre än de högsta predikterade halterna i Loddbyviken (ca 35 pg/l). Vilka källor som bidrar till att kontaminera Motala Ström är inte känt. Enligt mätningar utförda av Umeå Universitet förväntas PCB-halten ligga kring ca 12-14 pg/l i opåverkade vattendrag. Åtgärder för att minska belastningen från vattendraget bedöms i dagsläget inte medföra en positiv effekt på tillståndet i Bråviken.

## 11 Slutsatser kring tillämpning av verktyget

Resultaten från massbalansmodelleringen har bidragit till en ökad förståelse för hur olika källor och spridningsmekanismer samverkar i Bråviken. Olika typer av mätdata har kunnat processas på ett sätt som gett en tydligare helhetsbild eftersom modellen ger möjlighet att blicka framåt. Modellens främsta funktion är således att kunna testa utfallet av olika hypoteser. Då både mätdata och simuleringsresultat bearbetas samtidigt väcks nya frågeställningar kring vilka kunskapsluckor som kvarstår och områden där mer information kan behöva inhämtas är lättare att identifiera jämfört med om man bara utgår från mätdata.

Liknande verktyg som det som tillämpats i detta projekt har sin främsta användbarhet i myndigheternas åtgärdsarbete. Dels i tidiga skeden för att identifiera viktiga frågeställningar och göra prioriteringar för fortsatt arbete, men också för direkt utvärdering av olika åtgärdsförslag.

Även om modelleringen bidragit till en klarare bild över hur PCB sprids i Bråviken har resultaten inte kunnat användas för att identifiera vilka åtgärder som länsstyrelsen behöver gå vidare med. Med tanke på den diffusa föroreningssituationen avseende PCB var det inte helt oväntat att inga effektiva åtgärder kunde identifieras. För att demonstrera verktygets verkliga kapacitet angående effekter av åtgärder borde kanske ett annat studieobjekt ha valts där problematiken kännetecknas av ett tydligt högförorenat område.

Ett kvarstående problem för länsstyrelsen är att Bråviken kontaminerats med flera olika föroreningar och endast en förorening har processats i modellen. För organiska ämnen är det dock enkelt att utöka databasen för att därmed kunna göra fler simuleringar för andra ämnen än PCB. Tillgången på föroreningsdata för olika matriser/källor kan begränsa modellens framtida användbarhet då länsstyrelsen i sig inte förfogar över medel att göra de undersökningar som krävs för att få fram rätt underlagsdata. Ur detta perspektiv skiljer sig

länsstyrelsens resurser från forskarvärldens, då den senare kan söka projektmedel och ta fram dataunderlag vars omfattning saknar motsvarighet på myndighetsnivå. Bristande tillgång på lämpliga ingångsdata kommer förmodligen att upplevas som ett hinder även vid framtida modelltillämpningar som kan komma att utföras ur myndighetsperspektiv. Till exempel upplevdes det som en begränsning att projektet avstod från att utnyttja befintliga data då det var osäkert vilken kvalitet det skulle ge på simuleringarna. Hindret bestod framförallt i bristande kvalitet på tidigare undersökningar (d.v.s. för höga detektionsgränser i förhållande till befintliga föroreningsnivåer) och att data inte var genererade på ett konsekvent sätt (d.v.s. olika provtagningsstrategier vid val av provtagningspunkter och provtagningsdjup). Länsstyrelsen upplever således att hela dataunderlaget för PCB inte kunnat komma till nytta. För att modelleringsverktyg rent allmänt ska finna acceptans behöver sannolikt olika projekt utföras för att undersöka vilken typ av data som behöver vara platsspecifik och vilken typ av data som kan ersättas med mer generella antaganden eller data med sämre kvalitet. Det optimala myndighetsverktyget ska också kunna processa både organiska föroreningar och oorganiska, vilket kan utgöra en utmaning då de i grunden styrs av olika fysikaliska-kemiska egenskaper. Det är dock ingen omöjlighet att hitta modelleringstekniska lösningar på detta problem.

Massbalansmodellen för Bråviken har byggts upp från början, vilket medfört att mycket tid gått åt till programmering och felsökning av modellen. Tidsåtgången för programmeringsdelen var något större än vad som uppskattats i projektets inledningsskede. Modellen som konstruerats är dock specifik för Bråviken och resultaten har bedömts som realistiska i förhållande till empiriska data. Ett alternativt tillvägagångssätt hade varit att inventera tillgången på massbalansmodeller som redan förpackats i användarvänliga gränssnitt, för att sedan gå vidare med att utvärdera användbarheten genom att simulera samma scenario och jämföra resultaten från de olika modellerna. I ett sådant upplägg behöver dock mycket tid läggas på att lära sig att förstå hur olika modeller är uppbyggda och anledningar till avvikande resultat mellan olika modeller skulle behöva undersökas, vilket också är ett tidskrävande arbete. Ett sådant upplägg hade t.ex. passat ett projekt vars syfte var att identifiera det mest pålitliga och användbara verktyget. Detta projekt avsåg dock att demonstrera hur massbalansmodellering kan användas som ett kompletterande verktyg till traditionell provtagning och kemiska analyser. Bristande tillgång på vissa platsspecifika data (t.ex. avseende partikelkemi och sedimentationsdynamik) bidrar till osäkerheter i resultaten. Projektet har dock gynnats av att tillgången på geografiska/fysiska data varit relativt god tack vare SMHI:s arbete med kustzonmodellen.

Istället för att konstruera en specifik massbalansmodell med hög geografisk upplösning hade ett alternativ kunnat vara att ta fram en mer generell modell där inverkan från olika källor hade studerats i ett delområde i taget. I en generell modell kan anpassningar för att ta hänsyn till varierande egenskaper i landskapet också göras, men anpassningarna blir inte lika förfinade som i en platsspecifik modell. Det är osäkert hur resultat och slutsatser från en generell modell hade sett ut i förhållande till de resultat och slutsatser som genererats under detta projekt. Med all sannolikhet hade även en generell modell varit till nytta för att identifiera behovet av åtgärder inom Bråviken och en sådan hade enklare kunnat anpassas för tillämpning vid andra områden. Viktigt är också att massbalansmodeller kan kopplas till ekologiska modeller då mycket av länsstyrelsens arbete går ut på att säkerställa vattenområdenas ekologiska status.

Projektets erfarenheter kan summeras med att massbalansmodellering i kombination med empiriska data kan öka myndigheternas förståelse för hur olika källor och spridningsvägar samverkar inom och mellan olika system. De kan även bidra med att identifiera områden med kunskapsluckor vilka kan minskas med t.ex. framtida provtagningssatsningar och de passar som verktyg i åtgärdsförberedande faser.

För att massbalansmodellering i framtiden ska bli ett effektivt myndighetsverktyg behöver ett fokuserat arbete bedrivas i syfte att hitta rätt utformning på modellverktygen så att de motsvarar myndigheternas behov och kan anpassas till flera olika situationer. Stockholms universitet ser t.ex. en möjlighet att befintliga modeller som beskriver hydrologi och sedimentdynamik anpassas till simulering av spridning av både organiska och oorganiska föroreningar. Ett sådant arbete kan utföras i samarbete med andra aktörer, t.ex. SMHI som utvecklad en kustzonmodell för stora delar av Sveriges kust. Arbetet med t.ex. Vattendirektivet innebär att åtgärder och beslut måste tas för en rad olika föroreningar och källor som förekommer i en och samma recipient, vilket innebär att det är svårt att få en förståelse för vilka åtgärder som tillsammans kan samverka för att förbättra en komplex föroreningssituation (avseende både kemisk och ekologisk status). För att åstadkomma denna helhetsbild är det nödvändigt att utveckla metoder för hur empiriska data kan användas tillsammans med modellsimuleringar för att ge stöd i åtgärdsarbetet. Verktygen behöver också utvärderas på ett systematiskt sätt och erfarenheter från flera olika tillämpningar behöver tas till vara så att trovärdighet kring verktygen byggs upp. I detta arbete har Naturvårdsverket en viktig roll då det är svårt för enskilda myndigheter att driva utvecklingen samtidigt som de äger själva problemet.

## 12 Referenser

Hifab, 2009. Inre Bråviken- fältundersökning, riskbedömning, åtgärdsbedömning, förslag till fortsatta arbeten. Hifab AB, rapport 2009-08-14.

Hifab 2011. Resultatrapport fältundersökning av PCB<sub>7</sub> i Bråviken 2010. Hifab AB, 2011-03-16.

Mackay, 2001. Multimedia environmental models: the fugacity approach. Second edition. Lewis publishers.

Macleod, M, McKone, T.E., Mackay, D., 2005. Mass balance for mercury in the San Francisco Bay area. Environmental Science and Technology, 39: 6721-6729.

Naturvårdsverket, 2009. Sources, transport, reservoirs and fate of dioxins, PCBs and HCB in the Baltic Sea environment. Naturvårdsverket, Rapport 5912.

NIVA, 2005. Simulating the fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Sunndalsfjord. Norwegian Institute for Water Research, Report SNO 5113-2005.

SGI, 2010. Bråviken-Händelö. Grundvattenprovtagning i upplag med muddermassor från Bråviken. SGI, 2010-08-16.

SMHI, 2003. Kustzonssystemet i regional miljöanalys. SMHI, Nr 74.