

Massbalans av PFOS i Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen



Marko Filipovic

Sellén & Filipovic

VI KAN MILJÖFÖRORENINGAR

Sellén & Filipovic

VI KAN MILJÖFÖRORENINGAR

Version:	Slutversion
Datum:	2023-09-08
Uppdrag:	Massbalans av PFOS i Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen
Uppdragsnummer:	12822014

Uppdragsledare, Handläggare, Specialist:	Marko Filipovic
Granskare, Handläggare:	Ebba Sellén
Handläggare:	Meighan Boyd
Handläggare:	Nik Ahmad Pour Kermanshahi
Illustratör:	Andreas Ekoutsidis

Sellén & Filipovic AB arbetar enligt sitt kvalitets-, miljö- och arbetsmiljöledningssystem, vilket är certifierat enligt kvalitetsstandarden ISO 9001:2015, miljöledningsstandarden ISO 14001:2015 och arbetsmiljöstandarden ISO 45001:2018.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	1
1 Inledning	2
1.1 Syfte	3
2 Lokalisering.....	4
3 Kemiska och fysikaliska egenskaper som påverkar PFAS fördelning i miljön	5
4 Metod.....	7
4.1 Kvalitetssäkring av data	7
4.2 Vattenmassbalanser	8
4.3 Beräkning av Inflöde och utflöde av PFOS.....	10
5 Resultat och diskussion.....	11
5.1 Osäkerheter	11
5.2 Massbalans av PFOS.....	13
6 Slutsatser och åtgärder	18
6.1 Viktiga slutsatser	18
6.2 Vidare bedömningar	18
7 Rekommendationer och framtida studier	19
8 Referenser.....	22
8.1 Litteratur	22
8.2 Personlig kommunikation	24

BILAGA 1. Massbalanser av PFAS i Brunnsviken, Strömmen och Lilla Värtan inom Stockholms stad

Sammanfattning

Syftet med det här uppdraget var att ta fram massbalanser av PFOS och PFAS för Brunnsviken, Strömmen och Lilla Värtan inom Stockholms stad. Målsättningen var att identifiera och kvantifiera betydelsen av olika transportvägar, sänkor (sedimentering) och/eller medier som bidrar till föroreningen för respektive recipient. Resultaten ska ligga till grund för prioritering av åtgärder för att minska PFAS förorening till Brunnsviken, Strömmen och Lilla Värtan inom Stockholms stad. Därutöver visar denna studie att massbalanser kan användas som ett verktyg för att på ett snabbt och effektivt sätt skapa förutsättningar för att identifiera viktiga transportvägar av föroreningar till vattenförekomster. PFAS möjlighet till långväga transport innebär att åtgärder uppströms ”vid källan” många gånger är en förutsättning för att god vattenkvalitet ska uppnås i en vattenförekomst.

Resultat från Stockholms stads miljögiftsövervakning och andra undersökningar av ytvatten, grundvatten, sediment och nederbörd har gett information om halter i miljön. Denna data har tillsammans med Stockholm Vattens uppgifter om halt i utgående vatten från reningsverk (Eriksson, 2022), modellerad data från vattenweb (*Vattenwebb* | SMHI, 2022) samt flödesdata från SMHI:s vattenmodell (Walve, 2021) använts för att upprätta vattenmassbalanserna inom respektive recipient och beräkna flöden av PFOS. Genom att skapa massbalanser av föroreningsspridning inom recipienterna har vi kunnat rangordna vilka transportvägar som är viktiga för spridningen. Osäkerheter och brister i underlag har identifierats både i data för vattenflöden och mätningar av PFAS-halter. Bristerna i underlaget diskuteras för att underlätta tolkningen av resultaten. Resultaten ska tolkas som förenklingar av det som sker i miljön och beaktas med försiktighet. Rapporten belyser behovet av utveckling och förbättring av data och metodik, men målsättningen har varit att arbetet ska bidra till en ökad förståelse för massflöden av PFOS och PFAS i Brunnsviken, Strömmen och Lilla Värtan inom Stockholms stad.

Huvudsyftet med studien var att undersöka belastningen av PFOS från atmosfärisk deposition och ytavrinning från avrinningsområde till recipient i relation till utbytet med angränsande vattenförekomster. Resultaten visar att atmosfärisk deposition som faller direkt på recipient och ytavrinning från land (undantaget Råstasjön som mynnar ut i Brunnsviken) är en mindre transportväg för PFOS till Brunnsviken, Strömmen och Lilla Värtan. I studien uppmärksammas att det saknas befintliga mätningar av PFOS i dagvatten. Ytavrinningen avser endast avledning av regn till recipient och beaktar ingen haltökning till följd av kontakt med jord, material och grundvatten. Sedimentering bedöms också vara en mindre sänka till samtliga recipienter.

Tillförsel av PFAS förorening via grundvattentransport saknas ofta i massbalansundersökningar. I Brunnsviken har vi identifierat två olika akvifärer som är förorenade med PFAS och har en trolig påverkar Brunnsviken. I rapport ”Grundvatten i Stockholm 2022” påvisades halter av PFAS-ämnen i samtliga provpunkter av totalt 360 analysresultat detekterades PFAS i 71% av dessa vilket indikerar att PFAS i grundvatten är vida spridd och kan innebära en negativ påverkan på kvaliteten av yt- och dricksvatten.

Massbalansen för Brunnsviken avgränsades geografiskt till det tekniska avrinningsområdet för Brunnsviken. En analys med en förenklad vattenomsättningsmodell visar att den huvudsakliga tillförseln av PFOS och PFAS domineras av inflöde från Råstasjön som är belägen inom Solna stad. Grundvatteninträngning i den norra delen av Brunnsviken bidrar med ca 4,5% av PFOS inflödet till

Brunnsviken, medan grundvatteninträngningen i den södra delen utgör ca 9,2% av PFOS inflödet till Brunnsviken. Massbalansen indikerar att det inte råder jämvikt i Brunnsviken, dvs det kommer in mer än det kommer ut.

Massbalansen för Lilla Värtan och Strömmen avgränsades geografiskt till deras tekniska avrinningsområden. Vi visar att för dessa recipienter är den stora förflyttningen av vattenmassor in och ut från recipienterna den viktigaste transportvägen av PFAS till och från recipienterna. Till Strömmen identifieras utgående vatten från Henriksdals reningsverk som en viktig transportväg för PFAS, men än mer betydande är inflöde från Mälaren.

Vi identifierar att källområden utanför Stockholms stads gränser har en stor bidragande påverkan på recipienterna. För att god kemisk status ska kunna nås för dessa recipienter krävs ett samarbete mellan kommuner. Uppströmsarbete är ett viktigt verktyg för att kartlägga föroreningskällor så att åtgärder kan sättas in vid huvudkällan och därmed minska belastningen på Mälaren, Strömmen och Lilla Värtan. Genom att identifiera viktiga transportvägar och källor så skapas bättre förutsättningar för att recipientens vattenkvalitet ska uppnå god status till år 2030.

1 Inledning

PFAS är kemikalier som har framställts av människan och har varit i produktion sen tidigt 1950-tal (Buck *et al.*, 2011). PFAS är en stor grupp av ämnen som omfattar mer än 4700 olika substanser av hundratals olika ämnesklasser vars specifika egenskaper bestäms av dess funktionella grupp (molekyldel) (*OECD Portal on Per and Poly Fluorinated Chemicals - OECD Portal on Per and Poly Fluorinated Chemicals*). På grund av de unika kemiska och fysikaliska egenskaperna som perfluoralkylkedjor besitter exempelvis olje/smuts/vattenavvisande (Schellenberger *et al.*, 2018), resistens mot kemisk, termisk och biologisk nedbrytning har PFAS funnit en omfattande industriell tillämpning, bland annat som polymeriseringshjälpmedel vid tillverkning av fluorpolymer, ytbehandlingar för textilier och livsmedelsförpackningar och ytspännings-sänkningsmedel i vattenhaltiga filmbildande skum (Glüge *et al.*, 2020). Gemensamt för alla PFAS är att de är mycket svårnedbrytbara och stannar kvar i miljön under mycket lång tid, och många PFAS kan spridas långväga via luft och vatten. Under början av 2000 talet analyserades främst två PFAS perfluoroktansyra (PFOA) och perfluoroktansulfonat (PFOS), analysomfånget har sen dess successivt ökat och idag utförs miljöövervakning på 28 olika PFAS i vattenförekomster inom Stockholms stad (Banzhaf *et al.*, 2017; Sellén and Sköld, 2021)(Banzhaf *et al.*, 2017).

Trots en växande mängd litteratur som visar förekomst av PFAS i den globala miljön är viktiga frågor rörande transport och slutligt öde av PFAS i miljön fortfarande obesvarade. PFAS-källor och transportvägar som leder till miljöförorening kan ses som antingen primära eller sekundära. Primära källor till yt och grundvatten är exempelvis brandövningsplatser där sker direktutsläpp av PFAS-kemikalier i miljön som t.ex. genom användning av PFAS-innehållande brandsläckningsskum (Filipovic *et al.*, 2014; Ahrens *et al.*, 2015). Sekundära källor är exempelvis avloppsvattenreningsverk som är påverkade av och källor uppströms i samhället (Filipovic and Berger, 2015; Fredriksson *et al.*, 2022). Sekundära källor karakteriseras av pågående frisättning från flera källor i låga koncentrationer som t.ex. från avgasning och/eller utlakning av PFAS från beläggning av kläder och textilier (Schellenberger *et al.*, 2019) och förslitning av byggmaterial belagt med PFAS.

Atmosfärisk deposition består av våtdeposition, gasfas samt partikeldeposition och har visat sig vara en viktig transportväg av PFAS till miljön. PFAS såsom PFOS och PFOA som är joniserade i miljön är vanligt förekommande i våtdeposition. Icke-joniska PFAS-prekursorer såsom fluorotelomeralkoholer är mer benägna att transporteras i gasfasen där de kan genomgå transformation till joniska PFAS innan de deponeras på land och vatten (Filipovic *et al.*, 2015; Björnsdotter *et al.*, 2022; Cousins *et al.*, 2022).

I Stockholms stad har PFAS i ytvatten och fisk övervakats under flera år i majoriteten av stadens vattenförekomster (Sellén and Sköld, 2021). Även sedimentprov från ett antal vatten har analyserats (NIRAS, 2019b). En tydlig påverkan ses på ytvattnets kvalitet då halterna av PFOS överskrider miljökvalitetsnormerna, även i provpunkter utan en tydlig lokal påverkan.

Påverkan av PFAS på ytvatten beror till stor del på spridning från avfallshantering, dagvatten, lakvatten från deponier, avnötning från material och släckning av bränder (användning av brandsläckningsskum innehållande PFAS). Spridning av PFAS kan också ske från diffusa källor via långväga transport i luft och via våt- och torrdeposition (NIRAS, 2017, 2019a). På senare tid har även transport of PFAS via förorenat grundvatten visat sig vara en transportväg som bör beaktas, då problematiken är vidspridd över hela landet (Gobelius *et al.*, 2018), och koncentrationer i grundvatten överstiger ofta Livsmedelsverks förslag till gränsvärde för dricksvatten (SGS Analytics, 2022)

Miljöförvaltningen behöver ökad kunskap om hur stor betydelse atmosfärisk deposition har som transportväg av PFOS och PFAS till Stockholms avrinningsområden och vattenförekomster. Uppdraget är en del i utvärderingen av möjliga föroreningskällor för PFOS och PFAS som ska fungera som underlag för åtgärder för att minska tillförseln av PFOS och PFAS till stadens vattenförekomster.

1.1 Syfte

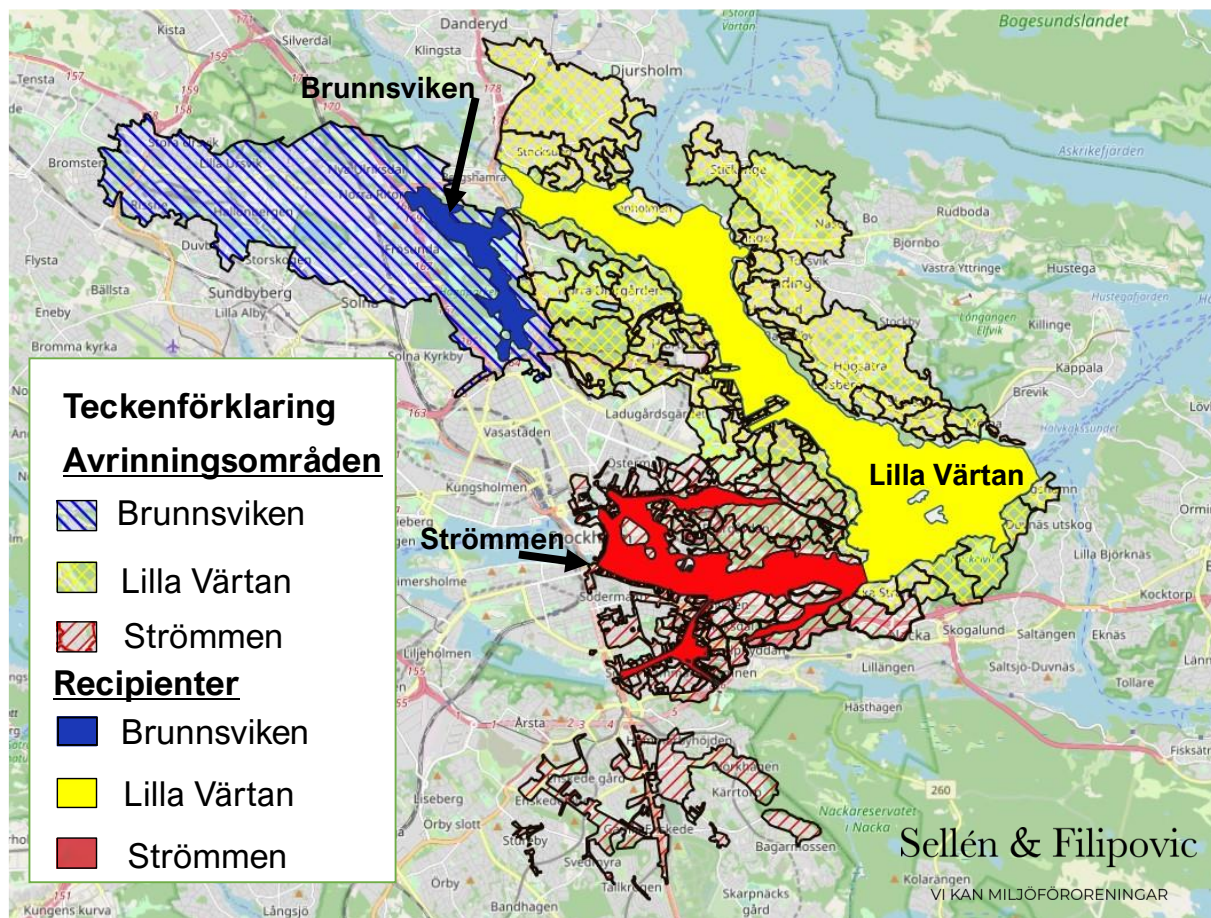
Uppdragets syfte är att skapa massbalanser av PFAS och specifikt utvärdera PFAS påverkan från nederbörd till kustvattenförekomsterna Lilla Värtan, Strömmen och Brunnsviken.

Frågeställningar:

- ▽ Hur stort är bidraget (mängd/år) av PFOS (eventuellt fler PFAS) till vattenförekomsterna Lilla Värtan, Strömmen och Brunnsviken via nederbörd inom det tekniska avrinningsområdet samt direkt deposition (nederbörd) (dvs övriga avrinningsområdet + direkt på recipient)?
- ▽ För Lilla Värtan och Strömmen: Relatera bidraget (mängd/år) av PFOS (eventuellt fler PFAS) från nederbörd till tillförsel av PFOS (mängd/år) via tillflödet från Mälaren samt till tillförseln från utgående vatten från Stockholms kommunala reningsverk.
- ▽ För Brunnsviken: Relatera bidraget av PFOS (eventuellt fler PFAS) från nederbörd till tillförsel av PFOS via tillflödet från Lilla Värtan och Råstasjön, samt tillförsel via grundvatten.
- ▽ Beräkna den totala belastningen till respektive recipient baserat på miljöförvaltningens miljögiftsövervakning samt recipienternas omsättningstider.

2 Lokalisering

Stockholm Vatten och Avfall äger och förvaltar nära 200 mil ledningsnät som hanterar dagvattenavrinning i Stockholm. Ungefär 100 mil av ledningsnätet består av ett kombinerat system, där spill- och dagvatten avleds i samma ledning och renas i reningsverk. Resterande 100 mil av ledningsnätet är utformat som ett duplikatsystem, d.v.s. dagvatten avleds separat till en närliggande recipient, bland annat Mälaren, Lilla Värtan och Strömmen (Stockholms stad, 2015). Baserat på information om tekniska avrinningsområden med utlopp till Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen, visualiseras samtliga avrinningsområden med recipienterna i Figur 1.



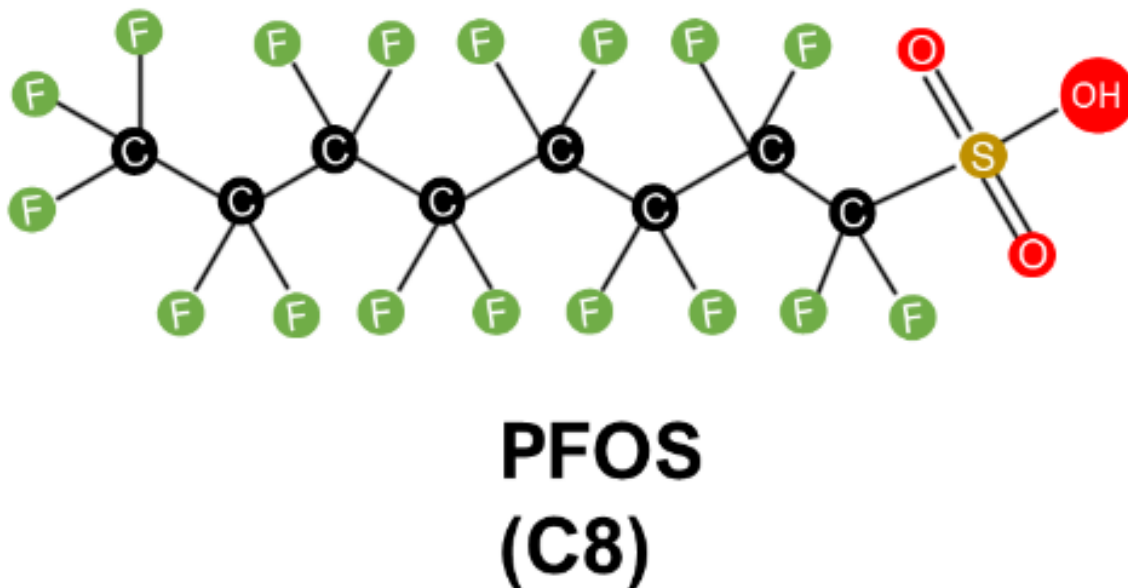
Figur 1. Avrinningsområden för Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen inom Stockholms stad, Solna, Nacka, Lidingö och Danderyd är markerade med streckade/rutade ytor. Recipienterna är markerade med fyllda ytor.

Tabell 1. Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmens avrinningsområde (km²), sjöyta (km²) och största djup (m) är presenterade nedan. Information har erhållits från Miljöförvaltningen.

Undersökta recipienter inom Stockholms stad	Avrinningsområde (km ²)	Sjöyta (km ²)	Största djup (m)
Brunnsviken	16	1,5	12
Lilla Värtan	23	13	44
Strömmen	13	4	24

3 Kemiska och fysikaliska egenskaper som påverkar PFAS fördelning i miljön

För att förstå hur PFAS sprids och fastläggs i miljön är det viktigt att förstå de fysikaliska och kemiska egenskaperna hos PFAS och hur de samverkar med den miljö som undersöks. Den vanligast analyserade perfluorerade sulfonsyran (PFSA) är perfluoroktansulfonsyra (PFOS). PFOS har åtta stycken fullt fluorerade kolatomer (C8), se Figur 2. Under naturliga förhållanden kommer PFOS molekyler (C8) vara fritt lösta i vatten som anjoner. PFOS molekyler kan fastläggas på jord, partiklar och sediment i miljön. PFOS är ett ämne som ansamlas och anrikas i djur och växter.



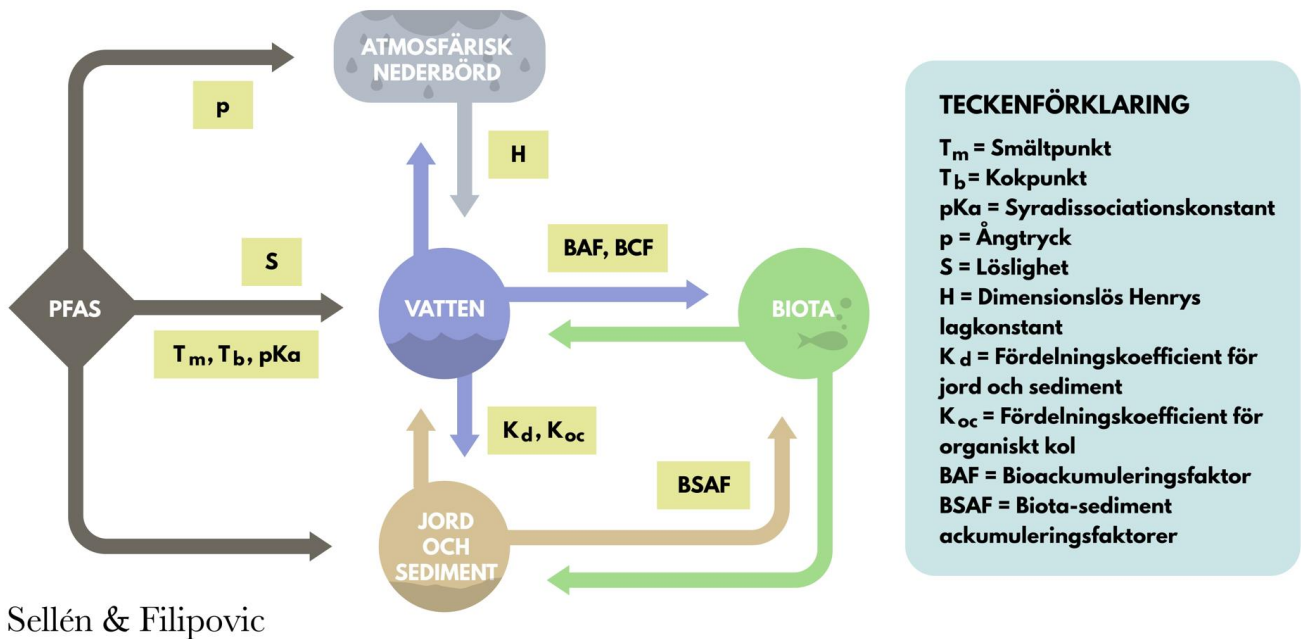
Figur 2. Molekylstruktur av Perfluoroktansulfonsyra (PFOS).

FAKTA PFOS

PFOS kemiska egenskaper nedan är hämtade från (4 Physical and Chemical Properties – PFAS — Per- and Polyfluoroalkyl Substances, 2022).

- Lösligheten (**S**) i vatten för PFOS (C8) är 7,7 mg/L.
- Ångtrycket (**p**) för PFOS (C8) har uppmätts till 1,2 log (Pa).
- Smältpunkten (**T_m**) och kokpunkten (**T_b**) har uppmätts till 211 C° respektive 249 C°.
- Uppmätta syradissociationskonstanten (**pK_a**) för PFOS är <0,3. Det vill säga att under naturliga förhållanden kommer PFOS molekyler (C8) vara fritt lösta i vatten som anjoner.
- Henrys konstant (**H**) för PFOS (C8) har uppmätts till 4,8*10⁻⁶ log Pa·m³/mol.
- Fördelningskoefficienter för jord/sediment och organiskt kol (**K_d**) respektive (**K_{oc}**) är koefficienter som beräknas utifrån uppmätta halter i fält. Då PFSA:s har en affinitet till organiskt kol är **K_{oc}** den parameter som kan ge information om hur väl PFSA-ämnena kommer att fastläggas till jord/sediment inom det undersökta området.
- Då de fysiska och kemiska egenskaperna i jord och vatten varierar så är K_{oc} värdena platsspecifika. I Mälarens respektive Östersjöns sediment har Log K_{oc} för PFOS (C8) uppmätts till log 2,8 respektive log 3,2.

Kemiska och fysikaliska egenskaper som påverkar spridning i miljön visas i Figur 3.



Figur 3. Viktiga kemiska och fysikaliska egenskaper som påverkar spridning och fastläggning i miljön har markerats med gult och är följande; T_m = smältpunkt; T_b = kokpunkt; pK_a = syradissociationskonstant; p = ångtryck; S = löslighet; H = dimensionslös Henrys konstant; K_d = fördelningskoefficient för jord och sediment; K_{oc} = fördelningskoefficient för organiskt kol. För biota kan BAF = bioackumuleringsfaktor; och $BSAF$ = biota-sediment ackumuleringsfaktorer beräknas.

4 Metod

4.1 Kvalitetssäkring av data

Föreliggande studie har omfattat utvärdering av data från genomförd övervakning av PFAS i recipienterna Råstasjön, Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen provtaget år 2021, atmosfärisk deposition provtaget år 2018–2019, utgående avloppsvatten provtaget år 2021. För att skapa en tillförlitlig modell över flödena har utvärdering och sammanställning av övervakningsdata begränsats till PFAS som påvisats i över 50% av analyserna.

I denna rapport redovisar vi massbalans för PFOS, i Bilaga 1 redovisas massbalanser för PFPeA, PFHxA, PFHpA och PFOA. Årsmedelvärde samt procentuell standardavvikelse har räknats ut med Microsoft Excel 2020. För alla beräkningar har ej detekterade halter beräknats både som noll och som rapporteringsgränsen delat med 2. På så sätt skapar vi en nedre/övre gräns i beräkningarna, om det råder stora skillnader betyder det osäkerhet i beräkningen.

Tabell 2. Analyserade PFAS-ämnen i respektive medium (atmosfärisk deposition, ytvatten och avloppsvatten) som påvisats i över 50% av analyserna är markerade med gröna celler. Vita celler visar PFAS ämnen som är ej undersökta eller som förekommer under 50% av analyserna.

Transportväg/PFAS	PFBS	PFHxS	PFOS*	PFBA	PFPeA*	PFHxA*	PFHpA*	PFOA*	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	6:2 FTSA	8:2 FTUCA	FBSA	FOSA
Atmosfärisk nederbörd																
Råstasjön																
Brunnsviken																
Lilla Värtan																
Strömmen																
Utgående avloppsvatten																
Mälaren (Riddarfjärden)																

*PFAS ämnen som förekommer över 50% av analyserna som massbalans har utförts för.

4.2 Vattenmassbalanser

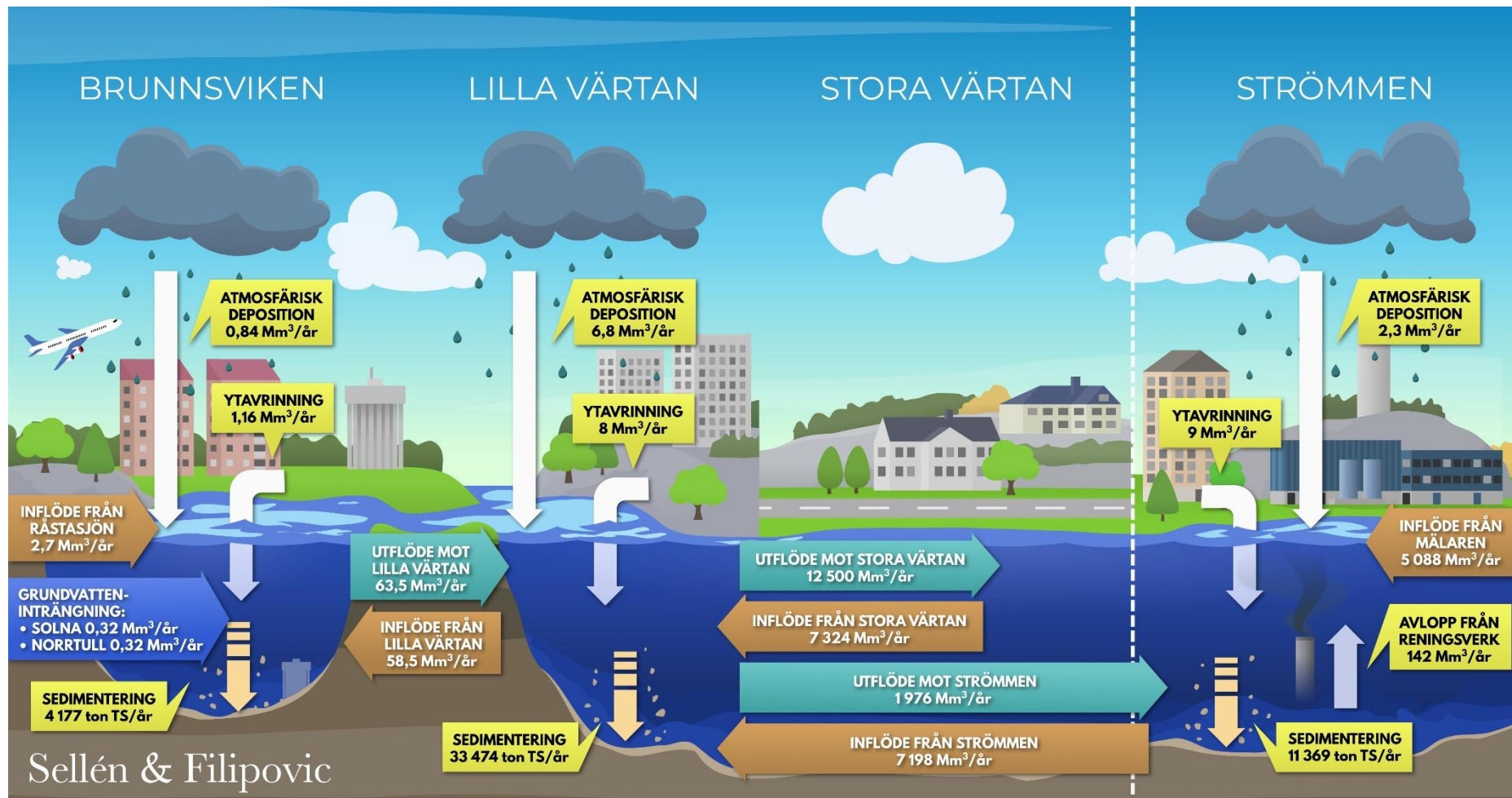
I denna studie används SMHI:s kustzonsmodell som delar upp vattenmassan i omkring 1 meter tjocka djupskikt från yta till botten i varje modellbassäng för Lilla Värtan och Strömmen (Walve, 2021). För Brunnsviken används modellerad och uppmätt data för att skapa en vattenmassbalans (Portin, 2011; Karlsson, 2016; Stockholms stad, 2022). Då det endast finns data för PFAS-halter i ytligt vatten görs antagandet att PFAS-halterna är jämnt fördelade i vattenkolonnen (NIRAS, 2018).

En förenklad en-boxmodell har skapats för Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen som snabbt visar och rangordnar bidraget av PFAS från olika transportvägar till recipient. Modellen är uppbyggd på årliga vattenflöden mätt i miljoner kubikmeter per år ($\text{Mm}^3/\text{år}$) till/från och mellan sjön och bassängerna se Figur 4.

För Brunnsviken beaktas tillflöden av vatten från våtdeposition på recipient och tekniskt avrinningsområde samt ytavrinning och via grundvatteninträngning. Ytavrinning delas upp i två separata tillflöden där (i) Råstasjöns inflöde beräknas separat från (ii) ytavrinning. Detta görs då förhöjda halter av PFAS har uppmätts i Råstasjön vilka inte återspeglar halter som mäts upp i atmosfärisk deposition. Vidare beaktas grundvatteninträngning från Solnaåsen till den nordvästra delen av Brunnsviken som ett tillflöde. Samt grundvattenmagasinet som ligger mellan Norrtull och Roslagstull, till södra delen av Brunnsviken som ett tillflöde. Information hur grundvatteninträngning till Brunnsviken har beräknats är beskrivet nedan i kapitel (5.1 Grundvatteninträngning). Utflöde av vatten från Brunnsviken sker via Ålkistan mot Lilla Värtan.

För Strömmen beaktas tillflöden av vatten från våtdeposition på vattenförekomst, dels på avrinningsområde (ARO) samt ytavrinning, tillflöden av vatten från Mälaren (Riddarfjärden), avloppsreningsverk (ARV), och genom utflöde från Lilla Värtan. Utflöde av vatten sker från Strömmen mot Lilla Värtan.

För Lilla Värtan beaktas tillflöden av vatten från våtdeposition direkt på vattenförekomst och inom avrinningsområde (ARO) genom ytavrinning. Tillflöde av vatten från Brunnsviken, Strömmen och Stora Värtan. Utflöde av vatten från Lilla Värtan sker mot Stora Värtan och Strömmen.



Figur 4. Förenklad boxmodell för Brunnsviken, Strömmen och Lilla Värtan med årsmedelflöden av vatten enligt Vattenwebs kustzonsmodell (Mm³). Flödet i Lilla Värtans yttre sund är de summerade flödena till och från Stora Värtan och Askrikefjärden. För Brunnsviken inkluderas estimerade tillflöden för grundvatten som transportväg som inte ingår i SMHI:s flödesberäkningar. Samtliga vattenflöden är angivna som miljoner kubikmeter per år, sedimentering är angivet som ton torrsustans per år (ton TS/år).

4.3 Beräkning av Inflöde och utflöde av PFOS

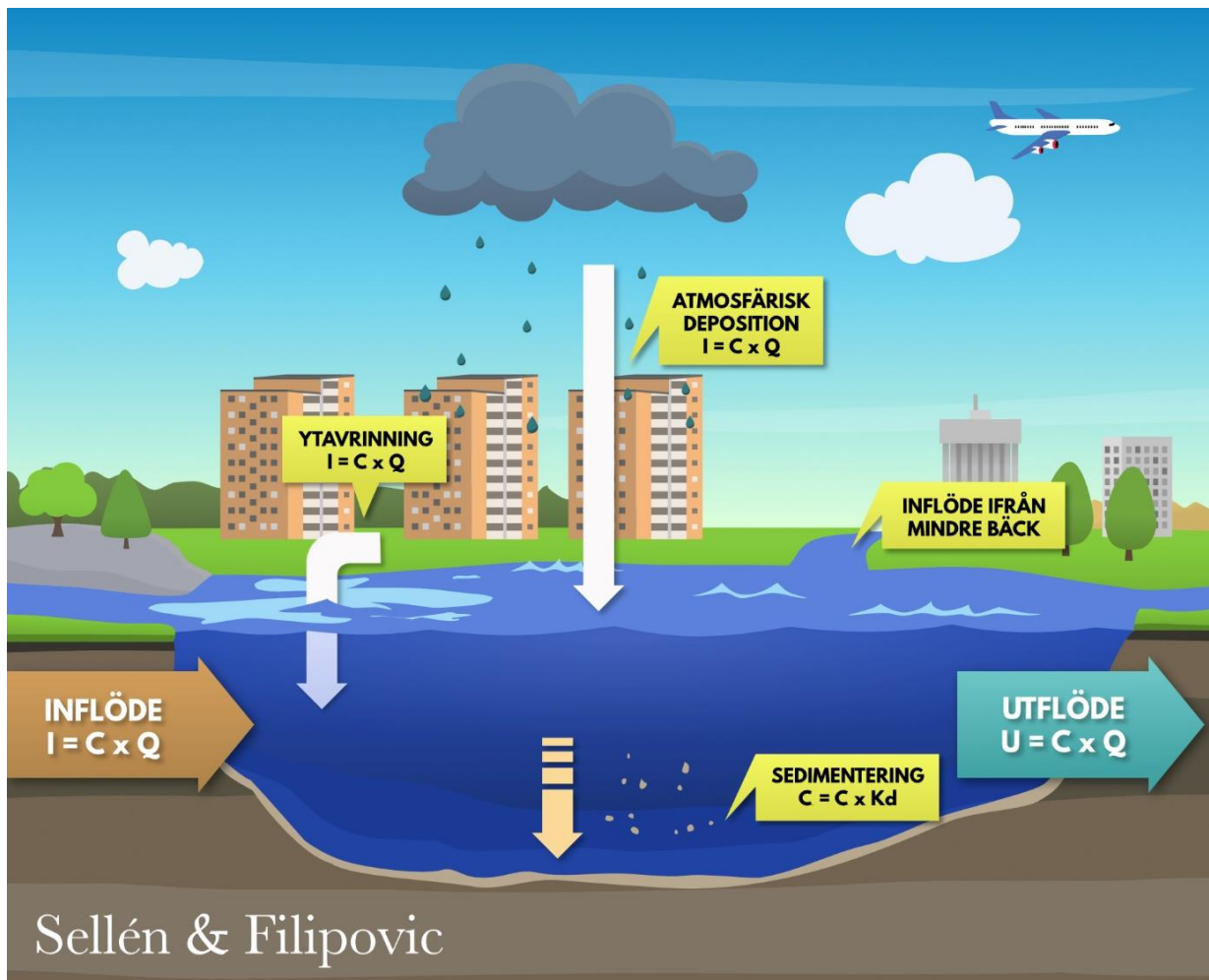
I Figur 4 visas förenklade ekvationer för upprättande av massbalans i en vattenförekomst, detaljerade ekvationer återfinns i Bilaga 1. Samtliga massflöden av PFOS i en vattenförekomst beräknas enligt ekvation 1. Där I är inflöde och/eller U är utflöde av PFOS, C är PFOS koncentration i respektive vattenförekomst, atmosfärisk deposition eller utgående vatten från avloppsreningsverk och Q är vattenflödet.

$$I \text{ inflöde/utflöde av PFOS} = C_{\text{PFOS koncentration}} * Q_{\text{vattenflöde}} \text{ Mm}^3 \quad (1)$$

Modellen inkluderar även sedimentation som sänka men inte återsuspension av PFAS från sediment till vatten, detta då det saknas information om detta. Då halveringstid av PFOS är i geologisk skala görs antagandet att nedbrytning under de miljöförhållanden som råder inom Stockholms stad är försumbar (Filipovic, Berger and McLachlan, 2013).

Sedimentation beräknas enligt principen i ekvation 2. Där C_{sediment} är koncentrationen av PFOS i sediment, $C_{\text{PFOS i ytvatten}}$ är koncentrationen av PFOS i vatten och K_d är fastläggningsförmågan av PFOS till sediment.

$$C_{\text{sediment}} = C_{\text{PFOS i ytvatten}} * K_d \quad (2)$$



Figur 4. En förenklad bild av in och utflöden i en vattenförekomst.

5 Resultat och diskussion

5.1 Osäkerheter

I en massbalansstudie är urvalet av data det mest betydande för resultatet av studien. Information som tillhandahålls ska således utvärderas noggrant innan den förs in i en modell. I detta kapitel diskuteras osäkerheter för fyra viktiga transportvägar i denna studie; atmosfärisk deposition, ytavrinning, grundvatteninträngning och utflöde från reningsverk.

5.1.1 Atmosfärisk deposition

Lipofila långlivade organiska föreningar som är benägna att transporteras långväga i atmosfären har ofta analyserats i atmosfärisk deposition. PFAS som PFOA och PFOS har låga syradissociationskonstanter (pK_a) och är joniska under de pH-värden som råder i miljön. Dessa PFAS förväntas inte avdunsta i betydande utsträckning och övervakas därför inte av nationella övervakningsprogram för atmosfärisk deposition. Det finns endast två studier som redovisar PFOA och PFOS i atmosfärisk deposition inom Stockholms stad (Johansson *et al.*, 2018; NIRAS, 2019a). PFAS-halter i atmosfärisk deposition från NIRAS rapport användes i våra beräkningar. De data som används i den aktuella studien för PFOA och PFOS är jämförbara med data från Stockholms universitet (Råö, Göteborg och Krycklan, Umeå) (NIRAS, 2019a). Därför är vår slutsats att Stockholms stads insamlade data är lämpliga för att representera den atmosfäriska depositionen i denna studie. För beräkning av nederbördsmängder använder vi oss av data från år 2021 då årsnederbörden vid Observatorielunden var normal, och uppgick till 555 mm.

5.1.2 Ytavrinning

Det finns vetenskapliga studier som visar att ytavrinning kan vara en transportväg för PFAS till intilliggande recipienter. Inom Stockholms stad finns det en undersökning där det har uppmätts förhöjda halter av PFAS i dagvatten som rinner ut i Årstaviken 2010 (NIRAS, 2017). PFAS i dagvatten som mynnar ut i Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen är inte väl undersökt inom Stockholms stad. I denna studie gör vi antagandet att atmosfärisk deposition är den huvudsakliga transportvägen av PFAS till det som mäts upp i ytavrinning. Det finns stora osäkerheter med detta antagande då vi inte inkluderar bidrag från källor inom avrinningsområdet som; förorenad mark, bidrag från diffusa källor till dagvatten som urlakning från bygg- och anläggningsmaterial eller verksamheter som inom avfallshanteringsområdet som återvinningscentraler (ÅVC) och/eller skrotar. Vi beaktar därför beräknad PFAS-tillförsel via ytavrinning till Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen som en osäker parameter i våra beräkningar.

Ett exempel på hur vi delar upp (i) ytavrinning från land till i Brunnsviken och (ii) inflöde via Råstasjön som tillhör Solna stad. I Råstasjön har förhöjda PFAS-halter uppmätts. Råstasjöns utflöde till Brunnsviken beaktas separat från ytavrinningen då halterna är mer än en tiopotens högre än det som mäts upp i atmosfärisk deposition.

5.1.3 Utflöde från reningsverk

Vetenskapliga studier där utgående vatten från reningsverk undersökts inom Stockholms stad har visat att dessa är en källa till PFAS i miljön. Under år 2021 renades 150 Mm³ vatten från Henriksdal och Bromma. Under detta år breddades 2,7 Mm³ vatten, d.v.s. cirka 2% av vattnet renades inte. Under år 2021 var denna siffra exceptionell hög då Henriksdals reningsverk var under renovering. Från år 2022 antas att breddningen av avloppsvatten kommer minska då båda reningsverken är i full drift. Vi bedömer att de uppmätta halterna i reningsverk är lämpliga att representera den påverkan utgående vatten från reningsverk har på Strömmen inom Stockholms stad (Filipovic and Berger, 2015; Eriksson, 2022). I vår massbalans antas flödet vara 142 Mm³ vatten från Henriksdal och Bromma, vilket skiljer sig cirka 5% från flödesmätningarna år 2021. Vi bedömer att denna felmarginal är acceptabel för massbalansen.

5.1.4 Grundvatteninträngning

Grundvatteninträngning som transportväg av PFAS föroreningar har tidigare förbisetts vid bedömning av påverkan på recipient. En anledning är att det oftast är brist på information gällande föroreningar i grundvatten, medan monitorering av ytvatten sker mer ofta. I denna studie uppmärksammar vi grundvatteninträngning som en potentiell transportväg av PFAS till Brunnsviken. En bedömning gällande storleken för grundvatteninträngning till Brunnsviken har erhållits från Helene Ejhed, SVOA. Grundvattenmodell har använts för att ta fram ett värde gällande flödes hastighet mot Brunnsviken, resultatet visar ett spann mellan 10–20 l/s. Detta baserades på data från SGI där uttagsmöjlighet för detta grundvattensmagasin ligger på 5–25 l/s (ca 400–2000 m³/d). De modellerade värdena måste beaktas med försiktighet, detta då det saknas uppmätta flöden för att verifiera dessa. PFAS-halter i grundvatten har erhållits för flera punkter inom det område som kan bidra med grundvatteninträngning. Halter och sammansättning varierar mellan provpunkterna vilket tyder på flera olika typer av källor som påverkar grundvattnet.

Vi har även identifierat ytterligare ett grundvattensmagasin med möjlig påverkan på Brunnsviken. Grundvattensmagasinet är beläget vid södra änden av Brunnsviken, mellan Norrtull och Rosalgstull, och benämns av SGI som magasin ID 202100006. Även det har tilldelats en uttagsmöjlighet på 5–25 l/s (ca 400–2000 m³/d). Provtagning i grundvattenrör (nr 51) av SGS Analytics utfördes under hösten 2022 och visar en PFAS-halt om 100 ng/L (SGS Analytics Sweden, 2022).

Grundvatteninträngning som transportväg av PFAS föroreningar har tidigare förbisetts. Ur ett långtidsperspektiv är monitorering och avgränsning av PFAS i grundvatten viktigt. Detta då lakning från källor på land kommer ske och påverka grundvatten under lång tid framöver. Det är viktigt att identifiera föroreningen så snabbt som möjligt för att minska risker. Detta motiveras även av att Livsmedelsverkets nya gränsvärde för PFAS i dricksvatten kommer justeras år 2026. Redan idag uppmäts flera PFAS nära eller över gränsvärdet i grundvatten och halterna är i vissa fall stigande (SGS Analytics, 2022).

5.2 Massbalans av PFOS

5.2.1 Brunnsviken

Brunnsviken är en avgränsad havsvik med begränsat vattenombyte med närliggande kustvatten, med en volym om 10,5 Mm³. I Brunnsviken sker ett kontinuerligt in-/utflöde av vatten från Brunnsviken till Lilla Värtan genom den så kallade Ålkistan. Omsättningstiden av ytvatten och djupvatten (som uppgår till 80% respektive 20% av Brunnsvikens volym är 1,9 månader respektive 3 månader) (Karlsson, 2016). Vidare sker utpumpning av vatten från Brunnsviken med syfte att syresätta Brunnsviken, enligt uppgifter från SVOA varierar volymen som pumpas ut årligen. Under år 2011 gjordes flödesmätningar där utflödet via utpumpning uppgick till cirka 7,7 Mm³ där utpumpningen i sig omsatte mer än 70% av Brunnsvikens volym (Portin, 2011).

I denna studie görs antagandet att vattnet som flödar in/ut via Ålkistan är delvis stående vatten, dvs att det till viss del är samma vatten som kommer in och ut. Detta antagande görs med anledning av följande iakttagelser (i) Om inflödet av lägre förorenat vatten från Lilla Värtan är stort skulle PFOS-halten i Brunnsviken minska avsevärt. (ii) I tidigare studier har uppmätt PFOS-halt i Brunnsviken inte sjunkit utan varierar åren 2010-2021 (Sellén and Sköld, 2021). I SMHI:s vattenmodell för Brunnsviken inkluderas inte utpumpning som ett vattenflöde ut från recipienten. För att minska osäkerheter med antaganden i denna studie, inkluderar vi inte grundvattenpumpning i våra beräkningar.

Massbalansen för Brunnsviken avgränsades geografiskt till det tekniska avrinningsområdet för Brunnsviken. En analys med en förenklad vattenomsättningsmodell visar att den huvudsakliga tillförseln av PFOS domineras av inflöde från Råstasjön som är belägen inom Solna stad. Lötsjön som mynnar ut i Råstasjön är också förorenad med PFOS, halterna av PFOS i ytvatten fördubblas i Råstasjön. Om det är en eller flera källor som bidrar till denna ökning är inte undersökt. Råstasjöns inflöde av PFOS till Brunnsviken beräknas till cirka 38 g/år eller 84% av det totala PFOS-inflödet till Brunnsviken se Tabell 3. Den näst viktigaste transportvägarna är inträngning via grundvatten från Solna grundvattentäkt samt från Norrtull/Roslagstull. De uppmätta halterna av PFOS i grundvattenmagasinen i Solna respektive mellan Norrtull och Roslagstull är 5 ng/L (SVOA), respektive 13 ng/L (SGS Analytics Sweden, 2022). Totalt är grundvatteninträngningen en viktig transportväg som bidrar med cirka 2 g/år respektive 4 g/år från respektive magasin eller ca: 13% av det totala PFOS-inflödet. I dagsläget finns ingen identifierad källa som förorenar grundvattenmagasinet i Solna eller Roslagstull/Norrtull.

Inflödet av PFOS till Brunnsvikens avrinningsområde respektive recipient via atmosfärisk deposition beräknas till cirka 1,6 g/år respektive 0,17 g/år. Vilket tyder på att PFOS som deponeras på land också fastläggs inom avrinningsområdet (Filipovic *et al.*, 2015). Direktdeposition på recipienten utgör cirka 0,5% av det totala PFOS-inflödet. Ytavrinningen från avrinningsområdet uppgår till 0,25 g/år som är cirka 0,6% av det totala inflödet.

Genom att jämföra halten av PFOS i Lilla Värtan med Råstasjön, görs bedömningen att bidraget från Lilla Värtan är i samma storleksordning som atmosfärisk deposition, dvs av det mindre slaget.

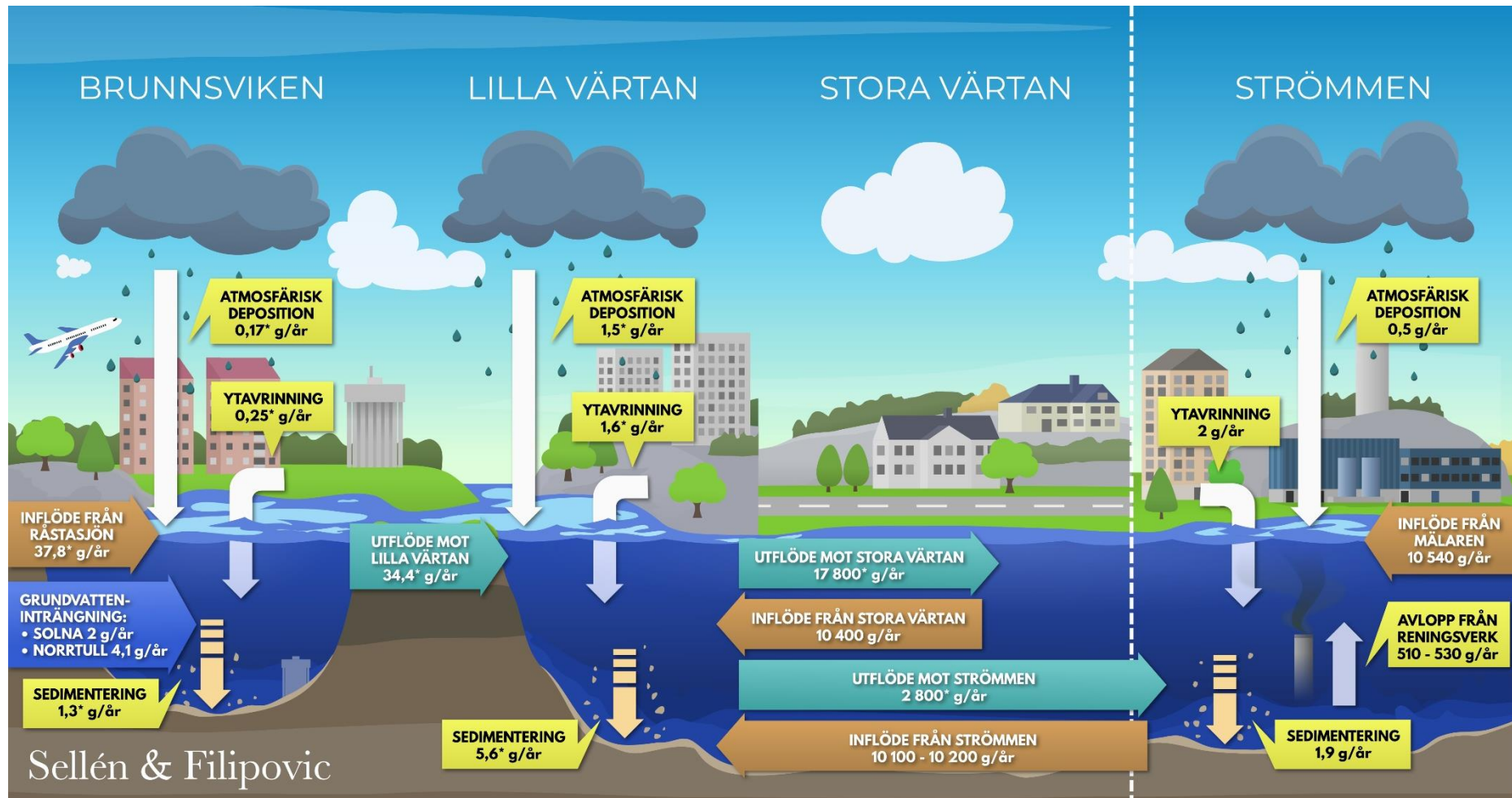
Utfloppet av PFOS från Brunnsviken bedöms uppgå till 45 g/år. Vid en massbalansberäkning uppgår utfloppet till Lilla Värtan till 79% av inflödet. Sedimentering av PFOS är en mindre sänka och bidrar till cirka 3,6% av det totala utfloppet.

Resultaten tyder på att inflödet av PFAS till Brunnsviken ökar. Genom att beakta datasetets storlek är vår bedömning att det troligen råder en jämvikt av PFOS i Brunnsviken, dvs den mängd PFOS som flödar in till Brunnsviken är i samma storleksordning som lämnar recipienten. I en tidigare sammanställning av data för Brunnsviken observeras inte haltökningar över tid (Sellén and Sköld, 2021) . Det är viktigt att veta att PFAS-halterna i den södra och den norra sidan av Brunnsviken troligtvis skiljer sig åt beroende på punktkällorna.

Tabell 3. Massbalans av inflöden/utfloppen av PFOS i Brunnsviken.

Massbalans Brunnsviken	Flöden (Q)* (Mm ³ /år)	PFOS (Cv)* (g/ Mm ³)	PFOS (I/U)* (g/år)	%
Atmosfärisk deposition på recipient	0,84	0,21	0,17	0,38%
Atmosfärisk deposition på land	8,0	0,21	1,6	
Inflöde från Råstaån	2,7	14	37,8	86,1%
Ytavrinning från land	1,16	0,21	0,25	0,6%
Grundvatteninträngning Solna	0,3	5	1,58	3,6%
Grundvatteninträngning Norrtull/ Roslagstull	0,3	13	4,1	9,3%
Utflopp Brunnsviken	4,9	7,0	34,4	96,4%
Sedimentering			1,3	3,6%
Inflöde totalt			45	
Utflopp totalt			35,7	

*Markerade parametrar som ingår i ekvation 1, Kapitel 5. Beräkning av Inflöde och utflopp av PFOS och PFAS.



Figur 5. Massflöden av PFOS i gram/år inom recipienterna Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen. PFOS-halterna är avrundade för lättare kunna överskådas. *Betyder att de beräknade halterna för den nedre/övre gränsen är densamma. Ytvavrinningen avser endast avledning av regn till recipient och beaktar ingen haltökning till följd av kontakt med jord, material och grundvatten.

5.2.2 Lilla Värtan

Massbalansen för Lilla Värtan avgränsades geografiskt till det tekniska avrinningsområdet för Lilla Värtan. En analys med en förenklad vattenomsättningsmodell visar att den huvudsakliga tillförseln av PFOS domineras av inflöde från Strömmen samt Stora Värtan, 10 200 g/år respektive 10 400 g/år. Vattnet i Strömmen är påverkad från olika källor uppströms i Mälaren (NIRAS, 2017). Då det saknas information gällande PFOS-halt i Stora Värtan har antagandet gjorts att det är samma halt i den som i Lilla Värtan. Antagandet gör att PFOS och PFAS inflödet från Stora Värtan är tämligen osäkert. PFOS-halterna i Strömmen är uppmätta och ger därmed en starkare indikation gällande massflödet av PFOS verkliga storlek.

Inflödet från Brunnsviken beräknas till 34,4 g/år. Transporten av PFOS via atmosfärisk deposition direkt på recipient är 1,4 g/år och ytavrinningen från land uppgår till 1,6 g/år. Det finns stora osäkerheter med detta antagande då vi inte inkluderar bidrag från primära källor inom avrinningsområdet som; förorenad mark och brandövningsplatser eller bidrag från diffusa källor till dagvatten som urlakning från bygg- och anläggningsmaterial eller verksamheter inom avfallshanteringsområdet som återvinningscentraler (ÅVC) och/eller skrotar. Då inflödet av PFOS från Strömmen och Stora Värtan är väldigt stora (>10 kg/år) finns en stor osäkerhet att bidrag via ytavrinning från högt förorenade områden likt Råstaån→Brunnsviken (40 g/år) som bedöms som mycket viktig transportväg förbises.

Utfödet från Lilla Värtan till Stora Värtan är det huvudsakliga utfödet av PFOS och beräknas till 17 800 g/år medan PFOS-transport till Strömmen beräknas till 2 800 g/år. Sedimentering av PFOS är en mindre sänka och beräknas till 5,6 g/år. Massbalansen tyder på att det är en jämvikt som råder i Lilla Värtan dvs det kommer in samma mängd PFAS som kommer ut.

Tabell 4. Massbalans av inflöden/utföden av PFOS i Lilla Värtan.

Massbalans Lilla Värtan	Flöden (Q)* (Mm ³ /år)	PFOS (Cv)* (g/ Mm ³)	PFOS (I/U)* (g/år)	%
Atmosfärisk deposition på recipient	6,8	0,21	1,4–1,7	0,007%
Atmosfärisk deposition på land/ytavrinning	8	0,21	1,6	0,009%
Inflöde från Brunnsviken	8	5,0	34,4	0,2%
Inflöde från Stora Värtan	7 324	1,42	10 400	50%
Inflöde från Strömmen	7 198	1,42	10 100–10 200	49%
Utföde mot Stora Värtan	12 500	1,42	17 800	86%
Utföde mot Strömmen	1 976	1,42	2 800	14%
Sedimentering			5,6	0,03%
Inflöde totalt			20 600	
Utföde totalt			20 600	

*Markerade parametrar som ingår i ekvation 1, Kapitel 5. Beräkning av Inflöde och utföde av PFOS och PFAS.

5.2.3 Strömmen

Massbalansen för Strömmen avgränsades geografiskt till det tekniska avrinningsområdet för Strömmen. En analys med en förenklad vattenomsättningsmodell visar att den huvudsakliga tillförseln av PFOS domineras av inflöde från Mälaren med 10 532 g/år och att de kommunala reningsverken (Bromma och Henriksdal) står för cirka 510 g/år. Transporten av PFOS via atmosfärisk deposition direkt på recipient är 0,5 g/år och ytavrinningen från land uppgår till 2 g/år.

Avloppsreningsverk bidrar med 510–530 g PFOS/år till Strömmen. Bidraget från atmosfärisk deposition direkt på recipient är 0,5 g/år och ytavrinning från land bidrar med 2 g/år. Dessa två transportvägar bidrar endast till en liten del av den totala tillförseln till Strömmen. Likt för Lilla Värtan finns stora osäkerheter med denna beräkning då vi inte inkluderar bidrag från primära källor eller bidrag från diffusa källor.

Den huvudsakliga transporten av PFAS till Strömmen sker via inflöde från Mälaren. Källorna till Mälaren är många. Ekman and Ejhed (2022) identifierar följande källområden/transportvägar som viktiga; Fyrisån som är förorenad av flera olika källområden i Uppsalatrakten, Märstaån som är påverkat av brandövningsplats på Arlanda flygplats, avfallsdeponin Högbytorp. Vidare identifierar författarna att det saknas kunskap gällande källområden till västra delen av Mälaren som står för ca: 50 % av det totala inflödet till Görväln. I NIRAS (2017) rapport har brandövningsplatser identifierats i Stockholms stad. Storleken av deras belastning på Mälaren och därmed Strömmen är idag okänt.

Sedimentering av PFOS är en liten sänka på 1,9 g/år. Vid en massbalansberäkning uppgår inflödet till Strömmen till 109% av utflödet. Sedimentering av PFOS är en mindre sänka och bidrar till cirka 0,02% av det totala utflödet.

I en studie där PFAS tidstrender i recipienter inom Stockholms stad har utförts visar (Sellén and Sköld, 2021) att PFOS halterna i Saltsjön minskar över tid. En osäkerhet i denna massbalans kan vara att föroreningskällor som bidrar till ytavrinningen inte har identifierats.

Tabell 5. Massbalans av inflöden/utflöden av PFOS i Strömmen.

Massbalans Strömmen	Flöden (Q)* (Mm ³ /år)	PFOS (Cv)* (g/ Mm ³)	PFOS (I/U)* (g/år)	%
Atmosfärisk deposition på recipient	2,29	0,21	0,5	0,005%
Atmosfärisk deposition på land/ytavrinning	9	0,21	2,0	0,018%
Inflöde från Mälaren	5 088	2,07	10 540	95,2%
Inflöde från reningsverk	142	3,73	510–530	4,8%
Utflöde mot Lilla Värtan	7 198	1,42	10 100–10 200	99,98%
Sedimentering			1,9	0,02%
Inflöde totalt			11 070	
Utflöde totalt			10 200	

*Markerade parametrar som ingår i ekvation 1, Kapitel 5. Beräkning av Inflöde och utflöde av PFOS och PFAS.

6 Slutsatser och åtgärder

6.1 Viktiga slutsatser

I denna studie visar vi att massbalanser kan användas som ett verktyg för att på ett snabbt och effektivt sätt skapa förutsättningar för att identifiera viktiga transportvägar av föroreningar till vattenförekomster. För kommuner är uppströmsarbete ett viktigt verktyg för att identifiera kartlägga och avgränsa föroreningskällor till PFAS. Den höga vattenlösligheten av PFAS gör det möjligt för föroreningen att transporteras långa sträckor. Åtgärder uppströms ”vid källområdet” är många gånger en förutsättning för att god vattenkvalitet ska uppnås i en vattenförekomst.

6.2 Vidare bedömningar

I denna studie visar vi att bidraget av PFAS från atmosfärisk deposition är en mindre transportväg jämfört med de andra identifierade transportvägarna. Trots att låga halter uppmäts i atmosfärisk deposition är bidraget utifrån ett nationellt/globalt perspektiv väldigt viktigt. Bidraget från den atmosfäriska depositionen bidrog med en mindre procentsats av inflödet till de undersökta vattenförekomsterna. En stor anledning till det mindre bidraget är för Brunnsviken är förekomst av källområden av PFAS inom avrinningsområdet med stor inverkan på halter som mäts upp i recipienten. Medan för Strömmen och Lilla Värtan var de stora in- och utflödena av vatten de viktigaste transportvägarna av PFAS.

Resultaten från denna studie visar att PFOS-föroreningen i Brunnsviken inom Stockholms stad kan härröras till både källområden inom Stockholms stad och till källområden i intilliggande kommun/er. Till Brunnsviken identifieras även två olika grundvattenförekomster som potentiellt bidrar med PFAS förorening till sjön. För Brunnsviken konstateras att den huvudsakliga föroreningen härrör från inflöde från Råstaån. För att effektivt reducera föroreningsbelastningen är det mycket viktigt att identifiera och åtgärda samtliga större punktkällor som exempelvis utflöden från deponier, brandövningsplatser och industrier. Lokala släckinsatser kan även ha bidragit till den PFOS-förorening som mäts upp i Brunnsviken, dessa källors betydelse har dock inte undersökts eller utvärderats i denna studie.

I Brunnsviken görs även bedömning att vattenmassbalansen bör uppdateras. SMHI:s vattenföringsmodell beaktar inte utpumpning som utförs i Brunnsviken eller grundvatteninträngning som transportvägar av vatten in till sjön. Dessutom råder det stora osäkerheter hur PFAS transport sker genom Ålkistan. Genom att utföra provtagningar och stärka vattenmassbalansen för Brunnsviken kommer bättre bedömningar kunna utföras gällande föroreningsspridning till och från recipienten. I massbalansen beaktas inte upptag av PFAS i biota.

För att förstå föroreningskällorna till Strömmen och Lilla Värtan krävs en omfattande överblick över PFAS-källorna inom avrinningsområdet samt uppströms dessa recipienter. I tidigare studier har potentiella källområden identifierats inom Stockholms stad (NIRAS, 2017). I en

massbalans av PFAS-förening i Görvål identifieras att recipienten är påverkad av ett flertal större källområden som är belägna i kommuner uppströms recipienten (Ekman and Ejhed, 2022).

- ▽ I denna studie visar vi att Råstasjön troligtvis är förorenad från en/flera källområden uppströms. Då transport av förorenat vatten från Råstasjön via Råstaån medför störst föroreningsbelastning på Brunnsviken. Vi föreslår att ett samarbete över kommungränser uppförs för att identifiera källor som påverkar Lötsjön och Råstasjön och åtgärda källan/källorna till recipienten. Om källan/källorna till Råstasjön kan elimineras/minskas märkbart skulle föroreningsnivån i Brunnsviken kunna minskas med >90%.
- ▽ För Brunnsviken visar vi att PFAS spridning sker via grundvattnet och troligtvis är en viktigt och tidigare förbisedd transportväg av PFAS föroreningar till Brunnsviken. Ett helhetsperspektiv på vatten som transportmedel – både på ytan och som grundvatten – bör tillämpas för vattenlösliga föroreningar som PFAS.
- ▽ Då de stora vattenflödena styr föroreningstakten i Strömmen och Lilla Värtan är det viktigt att identifiera områden som bidrar till denna förorening. För att minska PFOS-föroreningen i Strömmen och Lilla Värtan föreslås att ett aktivt uppströmsarbete vidtas tillsammans med intilliggande kommuner för att identifiera och åtgärda källområden som har direkt påverkan på Mälaren.

För att minska PFAS-föroreningar i atmosfären krävs att både nationella och globala åtgärder vidtas. Ett sätt är att utesluta PFAS-användning i produkter där det inte är en nödvändig samhällsnytta. Efter ett svenskt-tyskt initiativ av KEMI och tyska miljömyndigheten UBA förbjuds 200 PFAS-ämnen i EU från och med februari 2023 (ECHA, 2021). Förbudet gäller sex långkedjiga Perfluorokarboxylsyror (PFCAs); perfluornonansyra (PFNA), perfluordekansyra (PFDA), perfluorundekansyra (PFUnDA), perfluordodekansyra (PFDODA), perfluoretridekansyra (PFTrDA) och perfluortetradekansyra (PFTeDA), samt runt 200 föreningar (prekursorer) som kan omvandlas till dessa. Fem europeiska myndigheter från Danmark, Norge, Tyskland, Nederländerna och Sverige menar att de begränsningar som gjorts hittills inte räcker eftersom PFAS sprids till människor och miljö på många olika sätt. Därför vill myndigheterna i stället hindra PFAS från att över huvud taget komma ut på marknaden, för att på så sätt förhindra att de sprids till människor och miljö. Förslaget offentliggjordes den 7 februari år 2023 av ECHA. I samband med att förslaget att förbjuda användning av PFAS i EU offentliggjordes i februari år 2023 publicerade KEMI uppgiften att 75 000 ton av PFAS årligen hamnar i miljön i Europa. Textilier, fluorgaser och medicinteknisk utrustning står för en stor del av utsläppen. Detta är ett steg i rätt riktning för att långsiktigt minska spridningen av PFAS i miljön.

7 Rekommendationer och framtida studier

Även om atmosfärisk deposition visade sig vara en mindre transportväg för PFOS till Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen lokalt så kan den vara en viktig transportväg av kortkedjiga och ultrakorta PFAS till avrinningsområden och recipienterna. Flera kortkedjiga

PFAS som trifluorsyra (TFA) som tillhör gruppen ultrakorta PFAS har påvisats i väldigt höga halter (> 100 ng/L) i atmosfärisk deposition i Sverige (Björnsdotter *et al.*, 2022). Idag saknas det kunskap gällande ultrakorta PFAS, deras giftighet, hur dessa sprids och vilka källor som bidrar till dessa. Vi föreslår att fortsatt provtagning av atmosfärisk deposition utförs samt att ultrakorta PFAS-ämnen analyseras i både atmosfärisk deposition och ytvatten.

I denna studie identifierar vi att det råder en stor kunskapsbrist gällande PFAS förekomst i dagvatten och ytavrinning. Ytavrinning kan vara förorenat från; förorenade markområden, tillskott till dagvatten från tex bygg- och anläggningsmaterial eller verksamheter som tex avfallshantering inom området (tex återvinningscentraler och/eller skrotar). För att öka kunskapen om PFAS i ytavrinning föreslås att större vattendrag och dagvattenledningar provtas för att undersöka huruvida ytvattenavrinning är en viktig transportväg av PFAS till recipienterna samt för att identifiera eventuella källområden inom avrinningsområdena.

Vi identifierar även att kunskapen för grundvatteninträngning som en transportväg av PFAS till vattenförekomsterna är begränsad. För Brunnsviken identifierade vi att grundvatteninträngning av PFAS förorenat vatten sker från två grundvattenmagasin; Solnaåsen, som är en del av Stockholmsåsen, samt från Roslagstull/Norrtull (ID 202100006). Genom att identifiera att dessa grundvattenmagasin är påverkade av PFAS och att de har en hydraulisk kontakt med Brunnsviken kunde vi inkludera dem i massbalansberäkningen. Vi visar att grundvatten kan vara en viktig transportväg av PFAS till Brunnsviken. Då PFAS sammansättningen skiljer sig mellan grundvattenförekomsterna, tyder det på att de är förorenade av två olika källor. Det är mycket viktigt att förbättra kunskapen om Brunnsviken och dess omgivningar för att kunna hantera föroreningsproblemen på ett effektivt sätt. Förslagsvis bör en historisk inventering utföras där dokumentering av primära källområden som deponier, industrier, brandövningsplatser och möjliga släckinsatser identifieras utföras.

I grundvattenprov från Stockholm ses en ökning av PFOS (och PFOA) i prov tagna år 2022 jämfört med proverna från år 2011–2012 (SGS Analytics, 2022). Då det saknas tidsserier av PFOS halt i grundvatten vet vi inte idag om spridningen har ökat eller minskat i grundvattnet.

PFAS-halter i sediment är inte väl undersökt i Brunnsviken, Lilla Värtan eller Strömmen. För att få en bättre uppfattning föreslås att provtagning av PFAS i ytsediment utförs. Tidigare studier har inte utfört analyser med låga rapporteringsgränser. Då PFAS-halter generellt är väldigt låga i atmosfärisk deposition och sediment föreslås att provtagningsmetodik tas fram av erfaren personal och att samtliga analyser utförs av laboratorier/universitet som har kapacitet att analysera ultra-låga halter.

En förbättrad kunskap om Brunnsviken skulle också göra det möjligt att arbeta med andra föroreningar i det sydliga grundvattensmagasinet, som också är förorenat med kvicksilver. Det skulle exempelvis vara möjligt att installera flödesmätare, liknande den som används i iFlux, för att mäta både grundvattensflöde och föroreningslöden. Med den typen av data skulle vi kunna kvantifiera mängden förorening, grundvattnets hastighet och flödesriktning. Denna typ av högkvalitativa data skulle bidra till en bättre förståelse av grundvattentransporten och föroreningspåverkan på dricksvattnet. För Brunnsviken har flera antaganden gjorts gällande vattenmassbalansen. För att skapa en bättre massbalans av PFAS behövs bättre förståelse för hur mycket vatten som flödar in och ut genom Ålkistan i Brunnsviken. En studie som belyser

denna kunskapslucka skulle kunna ge en mer säker bild över hur mycket Lilla Värtan bidrar till den PFAS som mäts upp i Brunnsviken.

Brunnsviken

- ▽ I framtida undersökningar föreslår vi både grundvattensflöden och föroreningsflöden undersöks inom de identifierade grundvattenförekomsterna. Genom att använda avancerade mättekniker, och flödesmätare som exempelvis iFlux, kan vi få en mer noggrann bild av flödesriktning och föroreningsflöden dvs belastning av Brunnsviken. Information kan användas för att utveckla strategier och för att minska deras påverkan. Genom att samla in högkvalitativa data och genomföra noggranna studier kan vi få en bättre förståelse för hur föroreningarna sprids och utveckla lämpliga åtgärder för att minska deras påverkan.
- ▽ När det gäller massbalansen av PFAS är det viktigt att förstå vattenflödet genom Ålkistan och hur mycket Lilla Värtan bidrar till föroreningen. Genom att genomföra studier som fokuserar på denna specifika kunskapslucka kan vi få en mer säker bild av hur PFAS sprids i området och vilka åtgärder som kan vara mest effektiva för att minska deras påverkan.
- ▽ Ett kontrollprogram bör uppföras för de grundvattenrör där förhöjda halter av PFAS har uppmätts. Detta för att kontrollera om källorna ökar eller minskar med tid.

Lilla Värtan och Strömmen

- ▽ I massbalansen för Lilla Värtan råder det stor osäkerhet i beräkningen av PFOS inflöde från Stora Värtan, vilket gör att beräkningen av massflödet blir mycket osäkert. Provtagning och analys av PFAS i ytvatten i Stora Värtan skulle ge en bättre förståelse av masstransporten mellan bassängerna.
- ▽ Vi identifierar att i Lilla Värtan och Strömmen är det de stora vattenflödena som styr massbalanserna av PFAS. Stora vattenflöden kan göra att mindre källområden med hög lokal påverkan förbises. Vi föreslår att dagvatten och ytavrinning utförs i utvalda punkter inom avrinningsområdet.

I dagsläget finns fler än 17 ytvattenförekomster inom Stockholms stad där det finns behov av att öka förståelsen kring PFAS-källor och -utbredning för att de ska uppnå god status till år 2030. Det krävs därför en strategi för att öka förståelsen av hur PFAS sprids till och mellan recipienterna.

2023-09-08

Marko Filipovic

Sellén & Filipovic AB

8 Referenser

8.1 Litteratur

Ahrens, L. *et al.* (2015) 'Stockholm Arlanda Airport as a source of per- and polyfluoroalkyl substances to water, sediment and fish', *Chemosphere*, 129, pp. 33–38. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.136>.

Banzhaf, S. *et al.* (2017) 'A review of contamination of surface-, ground-, and drinking water in Sweden by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs)', *Ambio*, 46(3), pp. 335–346. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0848-8>.

Björnsdotter, M.K. *et al.* (2022) 'Mass Balance of Perfluoroalkyl Acids, Including Trifluoroacetic Acid, in a Freshwater Lake', *Environmental Science & Technology*, 56(1), pp. 251–259. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04472>.

Buck, R.C. *et al.* (2011) 'Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins', *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4), pp. 513–541. Available at: <https://doi.org/10.1002/ieam.258>.

Cousins, I.T. *et al.* (2022) 'Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)', *Environmental Science & Technology*, 56(16), pp. 11172–11179. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02765>.

Ekman, F. and Ejhed, H. (2022) *Källor till PFAS, massbalans för Mälaren-Görväln*.

Eriksson, M. (2022) *Miljörapport 2021. Avloppsverksamheten Stockholm Vatten och Avfall. Stockholm Vatten och Avfall AB*. 22MB385, pp. 1–58.

Filipovic, M. *et al.* (2014) 'Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish', *Chemosphere* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.005>.

Filipovic, M. *et al.* (2015) 'Mass Balance of Perfluorinated Alkyl Acids in a Pristine Boreal Catchment', *Environmental Science & Technology*, 49(20), pp. 12127–12135. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03403>.

Filipovic, M. and Berger, U. (2015) 'Are perfluoroalkyl acids in waste water treatment plant effluents the result of primary emissions from the technosphere or of environmental recirculation?', *Chemosphere*, 129, pp. 74–80. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.082>.

Filipovic, M., Berger, U. and McLachlan, M.S. (2013) 'Mass Balance of Perfluoroalkyl Acids in the Baltic Sea', *Environmental Science & Technology*, 47(9), pp. 4088–4095. Available at: <https://doi.org/10.1021/es400174y>.

Fredriksson, F. *et al.* (2022) 'Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in sludge from wastewater treatment plants in Sweden — First findings of novel fluorinated copolymers in Europe including temporal analysis', *Science of The Total Environment*, 846, p. 157406. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157406>.

Glüge, J. *et al.* (2020) 'An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)', *Environmental Science: Processes & Impacts* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1039/D0EM00291G>.

Gobelius, L. *et al.* (2018) 'Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Swedish Groundwater and Surface Water: Implications for Environmental Quality Standards and Drinking Water Guidelines', *Environmental Science & Technology*, 52(7), pp. 4340–4349. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05718>.

Johansson, J.H. *et al.* (2018) 'Spatial variation in the atmospheric deposition of perfluoroalkyl acids: source elucidation through analysis of isomer patterns', *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(7), pp. 997–1006. Available at: <https://doi.org/10.1039/C8EM00102B>.

Karlsson, M. (2016) *Fosforutbyte i Brunnsviken*. NR U 5560. IVL Svenska Miljöinstitutet, pp. 1–10.

NIRAS (2017) *Identifiering av direkta och diffusa PFAS-källor för spridning till Mälaren inom Stockholms stad – En litteraturstudie*. Available at: http://miljobarometern.stockholm.se/content/docs/tema/vatten/miljogifter/Litteraturstudie_PFA_S_Stockholmsstad_Slutrapport_NIRAS_2017.pdf (Accessed: 11 December 2020).

NIRAS (2018) *PFAS utbredning i Mälarens vattenpelare*. Available at: <http://miljobarometern.stockholm.se/content/docs/tema/vatten/miljogifter/Huvudrapport-PFAS-Malaren-180608-inkl-bilaga.pdf> (Accessed: 15 December 2020).

NIRAS (2019a) *PFAS i atmosfärisk deposition inom Stockholms stad*.

NIRAS (2019b) *PFAS-SEDIMENT PFAS utbredning i Mälarens sediment*. Available at: http://miljobarometern.stockholm.se/content/docs/tema/vatten/sediment/PFAS%20i%20M%C3%A4larens%20sediment_med%20bilagor.pdf (Accessed: 11 December 2020).

OECD Portal on Per and Poly Fluorinated Chemicals - OECD Portal on Per and Poly Fluorinated Chemicals (2018). Available at: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/> (Accessed: 9 June 2021).

Portin, H. (2011) *Brunnsviken- Utvärdering av åtgärder för förbättrad vattenkvalitet*. Examensarbete 30 hp UPTec W11 001.

Schellenberger, S. *et al.* (2018) 'Facing the rain after the phase out: Performance evaluation of alternative fluorinated and non-fluorinated durable water repellents for outdoor fabrics', *Chemosphere*, 193, pp. 675–684. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.027>.

Schellenberger, S. *et al.* (2019) 'Release of Side-Chain Fluorinated Polymer-Containing Microplastic Fibers from Functional Textiles During Washing and First Estimates of Perfluoroalkyl Acid Emissions', *Environmental Science & Technology*, 53(24), pp. 14329–14338. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04165>.

Sellén, E. and Sköld, M. (2021) *PFAS TIDSTREND-Vetenskaplig sammanställning av Stockholms stads samlade miljögiftsövervakningsdata för PFAS i ytvatten och biota från insjöar, Mälaren och kustvattenförekomster i Stockholm*, pp. 1–105.

SGS Analytics Sweden (2022) *Grundvatten i Stockholm 2022*. Available at: <https://miljobarometern.stockholm.se/vatten/grundvatten/overvakning-av-grundvattenkvalitet/> or <https://miljobarometern.stockholm.se/content/docs/tema/vatten/grundvatten/Grundvatten-Stockholm-2022-Slutrappport.pdf>.

Stockholms stad (2022) *Fakta om miljön i Stockholm - Stockholms miljöbarometer*. Available at: <https://miljobarometern.stockholm.se/>.

Vattenwebb | SMHI (no date). Available at: <https://www.smhi.se/data/hydrologi/vattenwebb> (Accessed: 16 December 2022).

Walve, J. (2021) *Massbalanser för kväve och fosfor i Strömmen och Lilla Värtan – sammanställning, beräkningar och modelleringar baserade på data från vattenwebb och mätdata*. Miljöanalys SKVVF vid DEEP, SU/ JW Akvatisk Miljöutredning, pp. 1–32.

8.2 Personlig kommunikation

Maria Pettersson, Åsa Andersson från Stockholms stad har bidragit med nödvändig information och rapporter gällande vattenmassbalanser för recipienterna samt PFAS-halter inom Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen.

Fredrik Erlandsson från SVOA har bidragit till viktig information av flöden inom Brunnsviken och granskning av vattenmassbalansen för Brunnsviken i denna rapport.

Maria Eriksson och Katja Nähri från SVOA har bidragit med information gällande PFAS-halter i utgående vatten från Bromma och Henriksdals reningsverk.

Helene Ejehed från Norrvatten som har bidragit med nödvändig information för att uppskatta spridning av PFAS i grundvatten i Brunnsviken.

Linda Svensson från Solna stad har bidragit med ny information gällande uppmätta flöden i Råstasjöns utlopp och PFAS-halter.

Nils Ekeröth från NIRAS Sweden AB har bidragit med information gällande detaljer vid provtagning av sediment i Brunnsviken.

BILAGA 1

**MASSBALANSER AV PFAS I BRUNNSVIKEN, STRÖMMEN OCH LILLA
VÄRTAN INOM STOCKHOLMS STAD**
PROJEKTNUMMER: 12822014

Innehåll

1	Avrinningsområde och sjöyta.....	2
2	Massflöden av vatten och PFAS halter	2
3	Beräkningar för samtliga recipienter	3
3.1	Inflöde av PFAS via atmosfärisk deposition,	3
3.2	Sedimentering av PFAS	3
4	Beräkningar specifika för respektive recipient	4
4.1	Brunnsviken	4
4.1.1	Inflöde via Råstasjön.....	4
4.1.2	Inflöde via atmosfärisk deposition.....	4
4.1.3	Utflöde till Lilla Värtan.....	4
4.1.4	Sedimentering.....	5
4.2	Strömmen	5
4.2.1	Inflöde via Mälaren och Lilla Värtan.....	5
4.2.2	Inflöde från utgående vatten från Henriksdal och Bromma avloppsreningsverk.....	5
4.2.3	Inflöde via atmosfärisk deposition.....	5
4.2.4	Utflöde till Lilla Värtan.....	6
4.2.5	Sedimentering.....	6
4.3	Lilla Värtan	6
4.3.1	Inflöde Stora Värtan och Strömmen.....	6
4.3.2	Inflöde via atmosfärisk deposition.....	6
4.3.3	Utflöde till Stora Värtan och Strömmen.....	6
5	Massbalanser	7

1 Avrinningsområde och sjöyta

I Tabell 1 visas avrinningsområde och sjöyta för Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen.

Tabell 1. Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmens avrinningsområde (km²) och sjöyta (km²) är presenterade nedan. Information har erhållits från Miljöförvaltningen.

Undersökta recipienter inom Stockholms stad	Avrinningsområde (km ²)	Sjöyta (km ²)
Brunnsviken	16	1,5
Lilla Värtan	23	13
Strömmen	13	4

2 Massflöden av vatten och PFAS halter

Vattenflöden och PFAS halter som används för att beräkna massflöden i Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen redovisas i Tabell 2, Tabell 3 och Tabell 4.

Tabell 2. Årliga vattenflöden (Mm³) och uppmätta PFAS halter [ng/L] i Brunnsvikens avrinningsområde.

	Flöden	PFAS koncentrationer [ng/L]				
Massbalans Brunnsviken	Mm ³ /år	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA
Atmosfärisk deposition på recipient	0,84	0,21	0,22	0,59	0,67	0,78
Atmosfärisk deposition på land	8,0	0,21	0,22	0,59	0,67	0,78
Inflöde från Råstasjön	2,7	14,0	25,0	15,0	8,0	7,1
Ytavrinning från land	4,1	0,21	0,22	0,59	0,67	0,78
Utflöde Brunnsviken	7,64					
Sedimentering		5,01	1,94	2,07	1,13	1,52
Inflöde tot						
Utflöde tot						

Tabell 3. Årliga vattenflöden (Mm³) och uppmätta PFAS halter [ng/L] i Lilla Värtans avrinningsområde.

	Flöden	PFAS koncentrationer [ng/L]				
Massbalans Lilla Värtan	Mm ³ /år	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA
Atmosfärisk deposition på recipient	6,8	0,21	0,22	0,59	0,67	0,78
Atmosfärisk deposition på land	8	0,21	0,22	0,59	0,67	0,78
Inflöde från Brunnsviken	7,64	5,01	3,58	2,10	2,07	1,13
Inflöde från Stora Värtan	7324	1,42	0,60	1,02	0,55	0,93
Inflöde från Strömmen	7198	1,55	1,18	1,09	0,71	1,21
Utflöde mot Stora Värtan	12500	1,42	0,60	1,02	0,55	0,93
Utflöde mot Strömmen	1976	1,42	0,60	1,02	0,55	0,93
Sedimentering						
Inflöde tot						
Utflöde tot						

Tabell 4. Årliga vattenflöden (Mm³) och uppmätta PFAS halter [ng/L] i Strömmens avrinningsområde.

Massbalans Strömmen	Flöden Mm ³ /år	PFAS koncentrationer [ng/L]				
		PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA
Atmosfärisk deposition på recipient	2,29	0,21	0,22	0,59	0,67	0,78
Atmosfärisk deposition på land	9	0,21	0,22	0,59	0,67	0,78
Inflöde från Mälaren	5088	2,07	0,83	1,16	0,61	0,88
Inflöde från reningsverk	142	3,60	5,68	6,18	3,00	5,68
Utflöde mot Lilla Värtan	7198	1,40	0,75	0,99	0,58	0,88
Sedimentering						
Inflöde tot						
Utflöde tot						

3 Beräkningar för samtliga recipienter

3.1 Inflöde av PFAS via atmosfärisk deposition,

PFAS som faller ner med atmosfärisk deposition i (gram per år), beräknades enligt ekvation 1.

$$I_{\text{Atmosfäriskdeposition}} = C_{\text{deposition}} * Q_{\text{recipient/avrinningsområde}} \quad (1)$$

där $C_{\text{deposition}}$ är PFAS-koncentrationen i nederbörd (kg per kubikmeter vatten). Nederbördsmängd är mängd nederbörd som avsatts direkt på recipient eller avrinningsområde (kubikmeter vatten per år). En nederbörd om 555mm för år 2021 används vid beräkning av $Q_{\text{recipient/avrinningsområde}}$ (SMHI). $C_{\text{deposition}}$ beräknades från medelvärdet PFAS koncentrationer uppmätt i 12 bulkdepositionsprover som var provtagna under år 2018 till år 2019 inom Stockholms stad (NIRAS, 2019a), PFAS-halterna var uppmätta i låga (nanogram) nivåer, liknande halter har uppmäts runtom i Sverige och Norden (Filipovic *et al.*, 2015; Björnsdotter *et al.*, 2022; Cousins *et al.*, 2022).

För Brunnsviken delades ytavrinning i två delar (i) Inflöde via Råstasjön (beskrivs i kapitel 7.1 nedan) (ii) Vattenflödet från Råstasjön är beräknat till 2,7 Mm³/år. Råstasjön tillhör Brunnsvikens sekundära avrinningsområde som har en avrinningsyta på 6,5 km². Brunnsvikens primära avrinningsområde är 10 km². Genom att anta att avrinningen är proportionell mellan ytorna beräknas att ytavrinningen är 4,1 Mm³/år från det primära avrinningsområdet.

3.2 Sedimentering av PFAS

PFAS-mängden mätt i gram i Brunnsvikens, Lilla Värtans och Strömmens sediment (M_{sed}) beräknades enligt ekvation 2.

$$M_{\text{sed}} = C_{\text{sediment, recipient}} * A_{\text{recipient}} * d_{\text{sed}} * (1 - \phi_{\text{sed}}) * \rho_{\text{sed}} \quad (2)$$

är $C_{\text{sediment, recipient}}$ är PFAS-koncentrationen i bassängens ytsediment (gram PFAS per gram sediment torrsvikt), $A_{\text{recipient}}$ är recipientens yta (kvadratmeter), d_{sed} är det genomsnittliga djupet av ytsedimentet (meter), ϕ_{sed} är sedimentets porositet (kubikmeter vatten per kubikmeter bulk sediment), och ρ_{sed} är densiteten hos det torra sedimentet (kilogram per kubikmeter torrsubstans). $A_{\text{recipient}}$ anges i tabell 1. d_{sed} antogs vara 0,01 m i hela Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen. ϕ_{sed} sattes till 0,89, medan ρ_{sed} antogs motsvara 2500 kg/m³.

PFAS-koncentrationen i sediment, $C_{\text{sediment, recipient}}$ (gram PFAS per kilogram sedimenttorrvikt), beräknades utifrån PFAS-koncentrationen i vatten, $C_{\text{vatten, recipient}}$, med antagandet om jämviktspartitionering enligt ekvation 3:

$$C_{\text{sediment, recipient}} = C_{\text{vatten, recipient}} * K_d \quad (3)$$

där K_d är jämviktsfördelningskoefficienten (kubikmeter per kilo av sedimentets torrvikt). $C_{\text{vatten, recipient}}$ (kilogram PFOS per kubikmeter vatten) och K_d -värden uppmätta för Östersjöns sediment och Mälaren (1185 m³/kg respektive 630 m³/kg sediment torrvikt för PFOS) (Theobald *et al.*, 2009; NIRAS, 2019b) Det senare K_d -värdet användes för beräkning av PFAS i Brunnsvikens sediment.

4 Beräkningar specifika för respektive recipient

4.1 Brunnsviken

4.1.1 Inflöde via Råstasjön

Inflöde av PFAS, $I_{\text{Råstasjön}}$ (gram per år), beräknades enligt ekvation 4.

$$I_{\text{Råstasjön}} = C_{\text{Råstasjön}} * Q_{\text{Råstasjön}} \quad (4)$$

där $C_{\text{Råstasjön}}$ är PFAS-koncentrationen i Råstasjön (gram per kubikmeter) och $Q_{\text{Råstasjön}}$ är sjöns årliga utflöde (kubikmeter per år). $C_{\text{Råstasjön}}$ och $Q_{\text{Råstasjön}}$ har beräknats utifrån data från personlig kommunikation med Linda Svensson, limnolog på Solna kommun. De analyserade ytvattenproven togs i Råstasjöns utlopp under år 2021.

4.1.2 Inflöde via atmosfärisk deposition

Se beskrivning i avsnitt 3.1 ovan.

4.1.3 Utflöde till Lilla Värtan

Utflöde av PFAS, $U_{\text{Brunnsviken}}$ (gram per år), beräknades enligt ekvation 5.

$$U_{\text{Brunnsviken}} = C_{\text{Brunnsviken}} * Q_{\text{Brunnsviken}} \quad (5)$$

där $C_{\text{Brunnsviken}}$ är PFAS-koncentrationen i Brunnsviken (gram per kubikmeter) och $Q_{\text{Brunnsviken}}$ är sjöns flödes hastighet (kubikmeter per år). $C_{\text{Brunnsviken}}$ är den beräknade medelhalten från provtagning utförd år 2021, resultaten erhöles från Stockholms stads Miljöförvaltning. Brunnsvikens omsättningstid påverkas av ytvavrinning, atmosfärisk deposition på recipient, utpumpning samt in/utflöde från Lilla Värtan, hur mycket vatten som flödar och när detta sker är inte väldokumenterat. För att skapa en överblickbar vattenmassbalans i Brunnsviken antar vi att vattenmängden som tillförs via atmosfärisk deposition och ytvavrinning är det samma som utflödet från Brunnsviken. Antagandet görs därför: (i) vattennivån i Brunnsviken inte ökar över tid (ii) att halterna inte späds ut i Brunnsviken över tid (Sellén and Sköld, 2021).

4.1.4 Sedimentering

Se beskrivning i avsnitt 3.2 ovan.

4.2 Strömmen

4.2.1 Inflöde via Mälaren och Lilla Värtan

Inflöde av PFAS, $I_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}}$ (gram per år), beräknades enligt ekvation 6.

$$I_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}} = C_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}} * Q_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}} \quad (6)$$

där $C_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}}$ är PFAS-koncentrationen i Mälaren (Riddarfjärden) respektive Lilla Värtan (gram per kubikmeter) och $Q_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}}$ är Mälarens respektive Lilla Värtans utsläppshastigheter (kubikmeter per år). $C_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}}$ är de beräknade medelhalterna från Stockholms stads miljöövervakning utförd år 2021, resultaten erhöles från Stockholms stads Miljöförvaltning. $Q_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}}$ är framtaget från SMHI:s vattenmodellrapport (Walve, 2021).

4.2.2 Inflöde från utgående vatten från Henriksdal och Bromma avloppsreningsverk

PFAS-inflödet från avloppsreningsverk direkt i Strömmen, $I_{\text{Reningsverk}}$ (gram per år), beräknades enligt ekvation 7.

$$I_{\text{Reningsverk}} = C_{\text{Reningsverk}} * Q_{\text{Reningsverk}} \quad (7)$$

där $C_{\text{Reningsverk}}$ är medelkoncentrationen av PFAS i utgående vatten från Henriksdal och Bromma reningsverk (gram per kubikmeter) och $Q_{\text{Reningsverk}}$ är hela utflödet av renat avloppsvatten (kubikmeter per år) från reningsverken till Strömmen. För denna beräkning har halter från Bromma och Henriksdals reningsverk erhållits för år 2021 (Eriksson, 2022). Medelhalt av PFAS har använts då det inte var stor skillnad mellan de uppmätta PFAS-halterna i det utgående vattnet och då SVOA bedömer att reningsverken bidrar hälften var till det utgående vattnet som rinner ut i Strömmen.

4.2.3 Inflöde via atmosfärisk deposition

Se beskrivning i avsnitt 3.1 ovan.

4.2.4 Utflöde till Lilla Värtan

Utflöde av PFAS, $U_{\text{Lilla Värtan}}$ (gram per år), beräknades enligt ekvation 8.

$$U_{\text{Lilla Värtan}} = C_{\text{Lilla Värtan}} * Q_{\text{Lilla Värtan}} \quad (8)$$

där $C_{\text{Lilla Värtan}}$ är PFAS-koncentrationen i Lilla Värtan (gram per kubikmeter) och $Q_{\text{Lilla Värtan}}$ är Lilla Värtans utsläppshastighet (kubikmeter per år). $C_{\text{Lilla Värtan}}$ är den beräknade medelhalten från Stockholms stads miljöövervakning utförd år 2021, resultaten erhöles från Stockholms stads Miljöförvaltning. $Q_{\text{Mälaren, Lilla Värtan}}$ är framtaget från SMHI:s vattenmodellrapport (Walve, 2021).

4.2.5 Sedimentering

Se beskrivning i avsnitt 3.1 ovan.

4.3 Lilla Värtan

4.3.1 Inflowe Stora Värtan och Strömmen

Inflowe av PFAS, $I_{\text{Stora Värtan, Strömmen}}$ (gram per år), beräknades enligt ekvation 9.

$$I_{\text{Stora Värtan, Strömmen}} = C_{\text{Lilla Värtan, Strömmen}} * Q_{\text{Stora Värtan, Strömmen}} \quad (9)$$

där $C_{\text{Lilla Värtan, Strömmen}}$ är PFAS-koncentrationen i Lilla Värtan (denna koncentration användes då det saknas halter av PFAS i Stora Värtan) respektive Strömmen (gram per kubikmeter) och $Q_{\text{Stora Värtan, Strömmen}}$ är Stora Värtans respektive Strömmen utsläppshastigheter (kubikmeter per år). $C_{\text{Lilla Värtan, Strömmen}}$ är de beräknade medelhalterna från Stockholms stads miljöövervakning utförd år 2021, resultaten erhöles från Stockholms stads Miljöförvaltning. $Q_{\text{Stora Värtan, Strömmen}}$ är framtaget från SMHI:s vattenmodellrapport (Walve, 2021).

4.3.2 Inflowe via atmosfärisk deposition

Se beskrivning i avsnitt 3.1 ovan.

4.3.3 Utflowe till Stora Värtan och Strömmen

Utflowe av PFAS, $U_{\text{Stora Värtan, Strömmen}}$ (gram per år), beräknades enligt ekvation 10.

$$U_{\text{Stora Värtan, Strömmen}} = C_{\text{Lilla Värtan, Strömmen}} * Q_{\text{Stora Värtan, Strömmen}} \quad (10)$$

där $C_{\text{Lilla Värtan}}$ är PFAS-koncentrationen i Lilla Värtan (gram per kubikmeter) och $Q_{\text{Stora Värtan, Strömmen}}$ är Stora Värtans respektive Strömmen utsläppshastigheter (kubikmeter per år). $C_{\text{Lilla Värtan, Strömmen}}$ är den beräknade medelhalten från Stockholms stads miljöövervakning utförd år 2021,

resultaten erhöjls från Stockholms stads Miljöförvaltning. Q_{Stora Värtan, Strömmen} är framtaget från SMHI:s vattenmodellrapport (Walve, 2021).

5 Massbalanser

Vattenflöden, koncentrationer och massflöden redovisas i Tabell 5, Tabell 6 och Tabell 7 för Brunnsviken, Lilla Värtan och Strömmen.

Tabell 5. Årliga vattenflöden, PFAS koncentrationer samt PFAS massbalanser av PFOS, PFPeA, PFHxA, PFHpA och PFOA i Brunnsviken.

Massbalans Brunnsviken	PFAS massflöden [g]				
	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA
Atmosfärisk deposition på recipient	0,17	0,18	0,50	0,56	0,66
Atmosfärisk deposition på land	1,64	1,73	4,70	5,32	6,25
Inflöde från Råstasjön	37,8	67,50	40,50	21,60	19,17
Ytavrinning från land	0,84	0,89	2,41	2,73	3,21
Utflöde Brunnsviken	38,3	27,37	16,07	15,86	8,66
Sedimentering	1,3				
Inflöde tot	38,8	68,6	43,4	24,9	23,0
Utflöde tot	39,6	27,4	16,1	15,9	8,7

Tabell 6. Årliga vattenflöden, PFAS koncentrationer samt PFAS massflöden av PFOS, PFPeA, PFHxA, PFHpA och PFOA i Lilla Värtan.

Massbalans Lilla Värtan	PFAS massflöden [g]				
	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA
Atmosfärisk deposition på recipient	1,4	1,5	4,0	4,5	5,3
Atmosfärisk deposition på land	1,6	1,7	4,7	5,3	6,3
Inflöde från Brunnsviken	38,3	27,4	16,1	15,8	8,7
Inflöde från Stora Värtan	10425	4394	7471	4018	6789
Inflöde från Strömmen	11157	8501	7825	5127	8696
Utflöde mot Stora Värtan	17793	7500	12751	6858	11586
Utflöde mot Strömmen	2813	1186	2016	1084	1832
Sedimentering	5,6				
Inflöde tot	21622	12924	15316	9166	15499
Utflöde tot	20606	8686	14767	7942	13418

Tabell 7. Årliga vattenflöden, PFAS koncentrationer samt PFAS massflöden av PFOS, PFPeA, PFHxA, PFHpA och PFOA i Strömmen.

Massbalans Strömmen	PFAS massflöden [g]				
	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA
Atmosfärisk deposition på recipient	0,5	0,5	1,4	1,5	1,8
Atmosfärisk deposition på land	1,8	2,0	5,3	6,0	7,0
Inflöde från Mälaren	10540	4226	5902	3097	4461
Inflöde från reningsverk	511	806	877	426	806
Utflöde mot Lilla Värtan	10111	5409	7114	4195	6324
Sedimentering	1,893				
Inflöde tot	11052	5032	6780	3524	5268
Utflöde tot	10111	5409	7114	4195	6324

6 Referenser

Björnsdotter, M.K. *et al.* (2022) 'Mass Balance of Perfluoroalkyl Acids, Including Trifluoroacetic Acid, in a Freshwater Lake', *Environmental Science & Technology*, 56(1), pp. 251–259. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04472>.

Cousins, I.T. *et al.* (2022) 'Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)', *Environmental Science & Technology*, 56(16), pp. 11172–11179. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02765>.

Eriksson, M. (2022) *Miljörapport 2021. Avloppsverksamheten Stockholm Vatten och Avfall. Stockholm Vatten och Avfall AB*. 22MB385, pp. 1–58.

Filipovic, M. *et al.* (2015) 'Mass Balance of Perfluorinated Alkyl Acids in a Pristine Boreal Catchment', *Environmental Science & Technology*, 49(20), pp. 12127–12135. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03403>.

NIRAS (2019a) *PFAS i atmosfärisk deposition inom Stockholms stad*.

NIRAS (2019b) *PFAS-SEDIMENT PFAS utbredning i Mälarens sediment*. Available at: http://miljobarometern.stockholm.se/content/docs/tema/vatten/sediment/PFAS%20i%20M%C3%A4larens%20sediment_med%20bilagor.pdf (Accessed: 11 December 2020).

Sellén, E. and Sköld, M. (2021) *PFAS TIDSTREND-Vetenskaplig sammanställning av Stockholms stads samlade miljögiftsövervakningsdata för PFAS i ytvatten och biota från insjöar, Mälaren och kustvattenförekomster i Stockholm*, pp. 1–105.

Theobald, N. *et al.* (2009) *Entwicklung und Validierung einer Methode zur Bestimmung von polyfluorierten organischen Substanzen in Meerwasser, Sedimenten und Biota; Untersuchungen zum Vorkommen dieser Schadstoffe in der Nord- und Ostsee*. Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/entwicklung-validierung-einer-methode-zur> (Accessed: 22 September 2022).

Walve, J. (2021) *Massbalanser för kväve och fosfor i Strömmen och Lilla Värtan – sammanställning, beräkningar och modelleringar baserade på data från vattenwebb och mätdata*. Miljöanalys SKVVF vid DEEP, SU/ JW Akvatisk Miljöutredning, pp. 1–32.