



LIFE SOuRCE-projektet (LIFE20 ENV/  
ES/000880) finansieras av EU:s LIFE  
Program och deltagande organisationer.

September 2021 - januari 2026

Total kostnad: 2 837 085 Euro

EU bidrag: 1 551 373 Euro



## **LIFE SOuRCE**

Demonstration and evaluation of Sustainable On-site Remediation  
technologies for PFAS-ContaminatEd groundwater

LAYMAN report

# Bakgrund

Per- och polyfluoralkylsubstanser (PFAS) är en stor grupp av flera tusen syntetiska kemikalier som har använts brett sedan 1950-talet. Deras attraktiva egenskaper beror på deras exceptionella stabilitet: PFAS innehåller mycket starka kol-fluorbindningar och har en molekylstruktur med en vattenavvisande fluorerad "svans" och en hydrofil huvudgrupp. Denna kombination gör dem motståndskraftiga mot värme och nedbrytning. På grund av dessa egenskaper har PFAS använts i en mängd produkter, såsom non-stick köksredskap, vattenavvisande textilier, livsmedelsförpackningar och brandsläckningsskum.

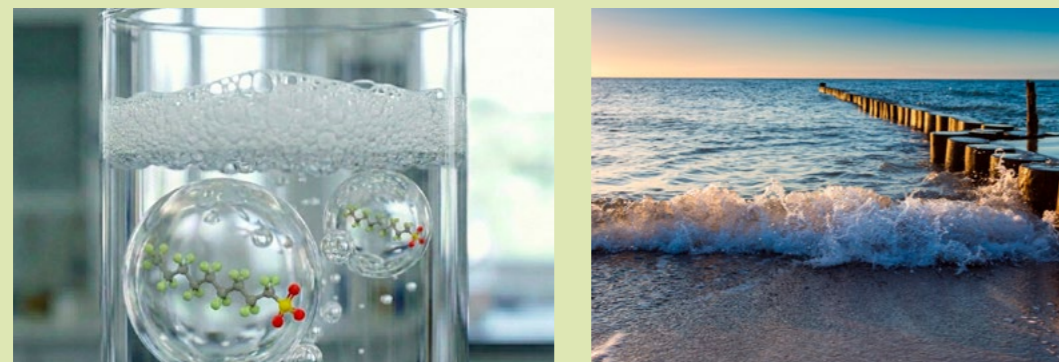
## Produkter som innehåller PFAS



Samma egenskaper som gör PFAS användbara gör dem också mycket långlivade och rörliga i miljön. De kallas ofta "evighetskemikalier" eftersom de inte bryts ned lätt och kan transporteras långa sträckor genom jord, grundvatten och ytvatten. Följden är att PFAS-ämnen nu förekommer i dricksvattentäkter, jordar, sediment, vilda djur och till och med i avlägsna områden som Arktis.

Exponering för vissa PFAS har kopplats till en rad hälsoproblem, däribland sköldkörtel- och leverstörningar, förhöjda kolesterolnivåer, nedsatt immunförsvar och en ökad risk för vissa cancerformer. Dricksvatten och livsmedel är de främsta exponeringsvägarna, särskilt för samhällen nära industriella anläggningar, brandövningsplatser och deponier. I hela Europa finns tusentals potentiellt PFAS-förorenade platser som hotar både ekosystem och dricksvattenförsörjning.

Mot bakgrund av den växande problematiken har Europeiska unionen infört strängare gränsvärden för PFAS i dricksvatten enligt direktiv (EU) 2020/2184. För att uppfylla dessa krav, och skydda folkhälsan, behövs innovativa och kostnadseffektiva saneringstekniker som kan avlägsna både långkedjiga och kortkedjiga PFAS från förorenade miljöer.



PFAS-molekyler har en vattenavstötande fluorerad svans och ett vattenälskande huvud, vilket gör dem starkt ytaktiva. De samlas därför där luft möter vatten, och stigande luftbubblor kan dra med sig molekylerna och bilda skum. Detta sker i naturen, till exempel när vågor bryts och havsskum bildas. Denna egenskap utnyttjas också i LIFE SOuRCE-projektet för att separera PFAS från förorenat grundvatten.

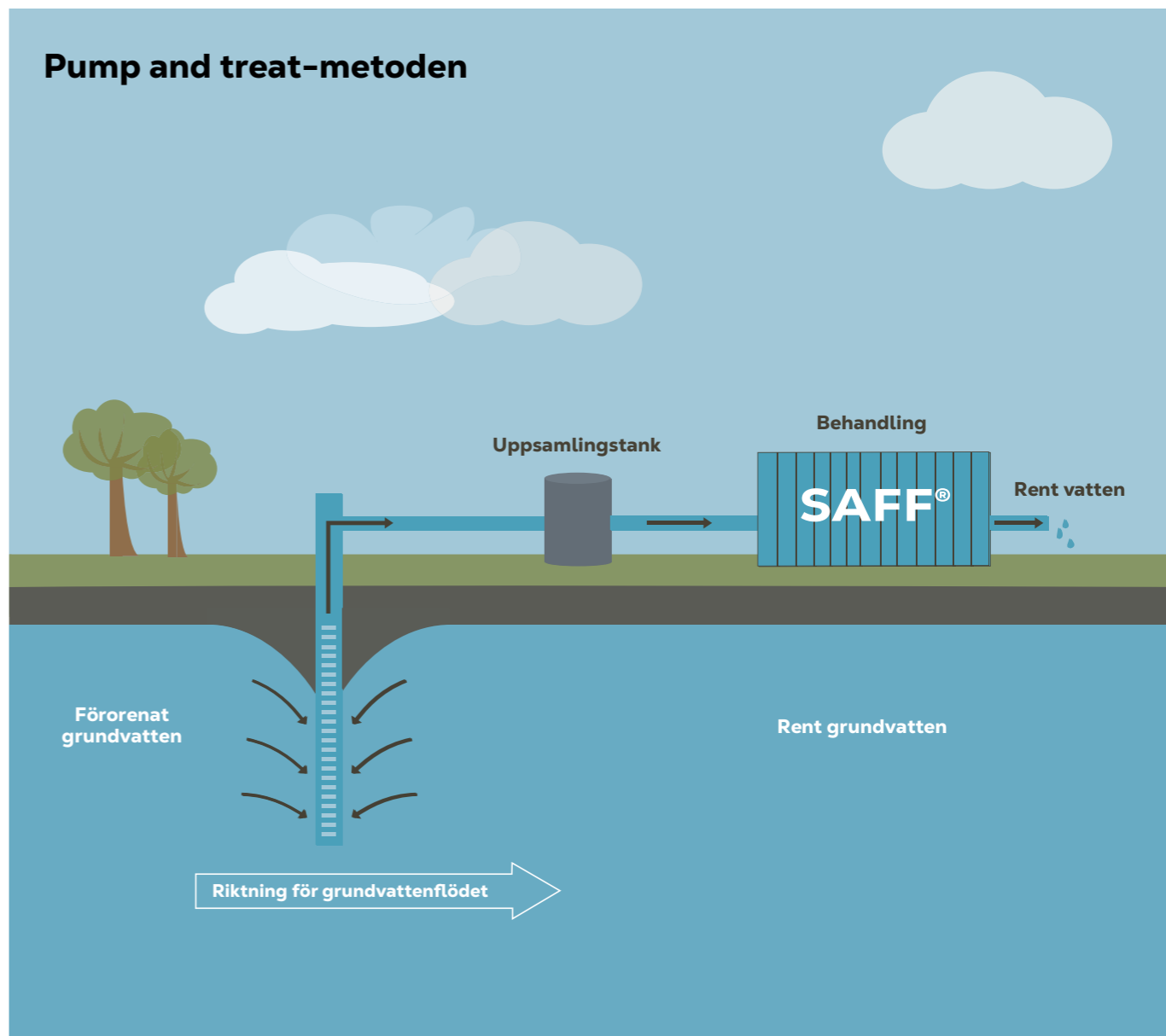
# LIFE SOuRCE-projektet

Syftet med LIFE SOuRCE-projektet var att demonstrera två olika behandlingskedjor, för att behandla PFAS-förorenat grundvatten direkt på platsen där vattnet pumpats upp. I projektet testades denna pump and treat-lösning på två olika platser och behandlingskedjorna omfattade tillsammans fyra kompletterande tekniker – ett separationssteg, två olika poleringssteg och en destruktionsprocess. Det övergripande målet var att visa att rening av PFAS-förorenat grundvatten kan göras effektivt och till en rimlig kostnad. Grundvattenpumpning och behandling, även kallad *pump and treat*, är en beprövad metod för att rena förorenat grundvatten. Metoden går ut på att pumpa upp vatten genom extraktionsbrunnar till markytan för behandling. Den här processen sänker grundvattenytan

och påverkar vattenflödet i området, vilket innebär att föroreningar dras mot pumpbrunnarna.

När vattnet har behandlats kan det återföras till marken eller släppas ut i en recipient, förutsatt att föroreningsnivåerna är tillräckligt låga. Tekniken möjliggör kontinuerlig övervakning av vattenkvaliteten och minskar risken för spridning av föroreningar.

Metoden fungerar bäst i akviferer med måttlig eller hög hydraulisk konduktivitet och är särskilt effektiv för att snabbt skydda dricksvattenresurser när föroreningskällor inte går att ta bort eller behandla på plats. Dessutom lämpar sig tekniken väl för föroreningar som är rörliga och lättlösliga i vatten, vilket många PFAS-ämnen är.



# Projekt mål och demonstration av behandlingskedjor

När projektet startade hade PFAS redan identifierats som en grupp ämnen som utgör en risk för miljön och människors hälsa i Europa. Målsättningen med LIFE SOuRCE var att demonstrera behandlingskedjor som kunde avlägsna mer än 99 % av långkedjiga PFAS och 95 % av kortkedjiga PFAS.

Projektet siktade på att möta de nya gränsvärdena i EU:s dricksvattendirektiv: 0,1 µg/L för enskilda PFAS-ämnen (för 20 reglerade ämnen) och 0,5 µg/L för totalhalt PFAS, samtidigt som behandlingskostnaderna skulle hållas låga, <0,1 €/m<sup>3</sup> behandlat grundvatten. Detta skulle göra det möjligt att använda de föreslagna teknikerna och behandlingskedjorna på många olika typer av förorenade platser.

För att nå dessa mål demonstrerade projektet följande tekniker som delar av behandlingskedjorna:

**SAFF Surface Active Foam Fractionation:** En fysisk separations- och uppkoncentreringsprocess som avlägsnar PFAS från vatten genom luftning, där föreningarna fäster

till luftbubblor och lyfts till vattenytan som PFAS-berikat skum.

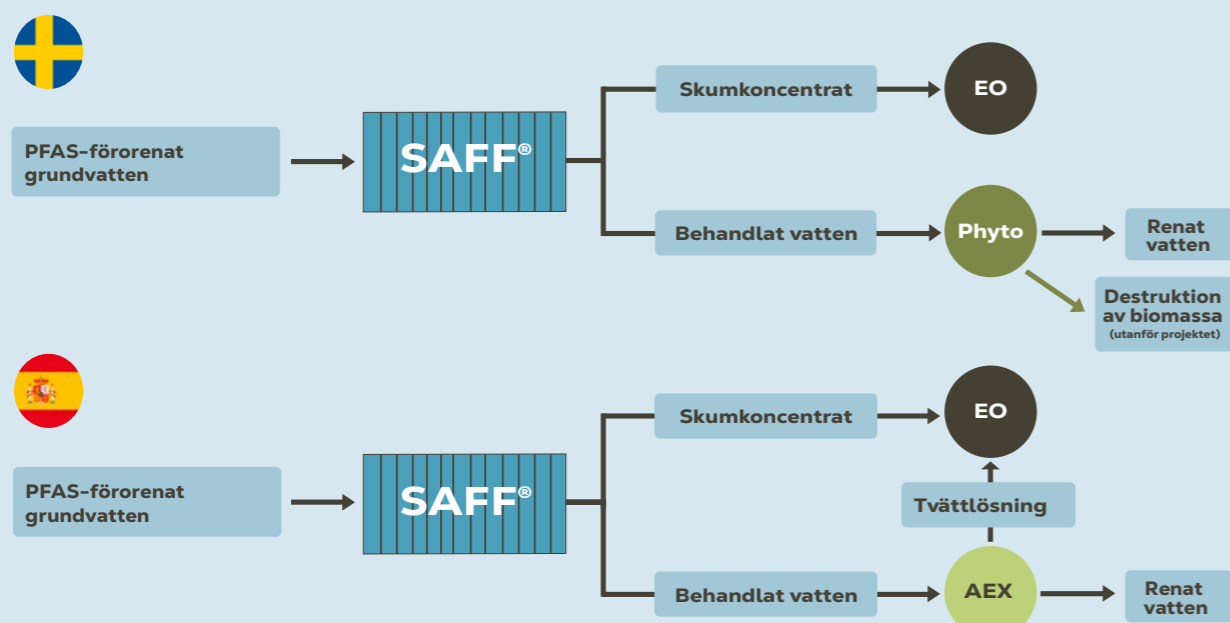
**AEX Anjonbytesfilter:** Ett poleringssteg med kolonner fyllda med skräddarsydda anjonbytarmassor som effektivt avlägsnar PFAS till icke-detekterbara nivåer.

**PHYTO Fytoremediering:** Ett poleringssteg med en konstruerad våtmark, planterad med Salix (vide), utformad för att fånga kvarvarande PFAS genom växtupptag och sorption till odlingssubstratet.

**EO Elektrokemisk oxidation:** En destruktionsprocess som använder bordopade diamantelektroder för att mineralisera PFAS till fluoridjoner (F<sup>-</sup>) och CO<sub>2</sub>.

Teknikerna testades på två helt olika platser, en deponi i Sverige och en brandövningsplats i Spanien, vilket gav värdefulla insikter om hur väl behandlingen fungerar under olika klimat, markförhållanden och nivåer av förorening. Genom att testa metoderna i så olika miljöer blev det tydligt hur väl de fungerar och hur anpassningsbara de är när de ställs inför verkliga utmaningar.

## De demonstrerade behandlingskedjorna



### Svenska lokalen

- Avfallsanläggning
- Tempererat klimat
- Källa till PFAS: deponi
- 3-4 µg ΣPFAS/L grundvatten
- Hög jonstyrka och hög halt DOC (löst organiskt kol)



### Spanska lokalen

- Brandövningsplats
- Medelhavsklimat
- Källa till PFAS: brandsläckningsskum
- 0.2-60 µg ΣPFAS/L grundvatten
- Låg jonstyrka och låg halt DOC (löst organiskt kol)



## Surface active foam fractionation

**SAFF (Surface Active Foam Fractionation)** använder små luftbubblor för att avlägsna PFAS från förorenat vatten. När luft injiceras i behandlingskolonnerna fäster PFAS-molekylerna vid de stigande bubblorna och förs upp till ytan, där de bildar ett PFAS-rikt skum som kan separeras och samlas in. Detta skum genomgår sedan ytterligare luftningssteg, vilket ger en mycket liten volym av högkoncentrerad PFAS-lösning som kan destrueras med kommersiella metoder som förbränning vid hög temperatur eller, vilket LIFE SOuRCE demonstrerat, behandlas och brytas ned direkt på plats med elektrokemisk oxidation.

Tekniken kan avlägsna upp till 99,9 % av långkedjiga PFAS, och med tillsatser kan höga reningsgrader även uppnås för kortkedjiga

PFAS. SAFF-tekniken är ett kompakt system som kan installeras i standardcontainrar.

Inom LIFE SOuRCE-projektet användes en SAFF20-enhet med en behandlingskapacitet på 10–20 m<sup>3</sup>



vatten per timme. Totalt behandlades 28 000 m<sup>3</sup> grundvatten på den svenska demonstrationslokalen under elva månaders drift, med en genomsnittlig energiförbrukning på 0,62 kWh/m<sup>3</sup>.

## Fytoremediering

Fytoremediering heter på engelska **Phytoremediation (PHYTO)**, och är en samlingsterm för olika sätt att rena förorenade jordar, vatten och luft med hjälp av växter. Fytoremediering användes på vattnet som behandlats med SAFF för att förbättra avskiljningen av kortkedjiga PFAS, som SAFF fångar mindre effektivt.

Pilotanläggningen för fytoremediering konstruerades som en våtmark, med ett genomgående vattenflöde, där Salix (vide) odlades i en växtbädd fylld med torv och biokol som odlingssubstrat. Till substratet fastnade främst de återstående långkedjiga PFAS-ämnen, medan växterna (Salix) tog upp kortkedjiga PFAS i sina stammar och blad. När PHYTO ingick i behandlingskedjan ökade den totala avskiljningen av

summahalten av 20 olika PFAS från 48 % till 75 %, främst eftersom kortkedjiga PFAS fångades mer effektivt.

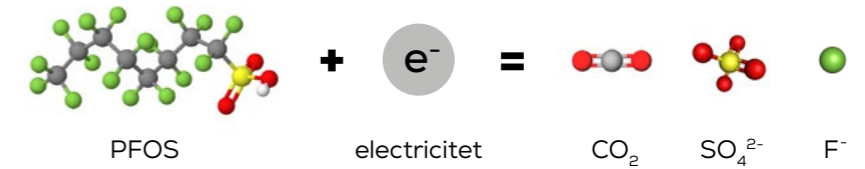
Projektet visade också på viktiga begränsningar med tekniken. Fytoremediering kräver stora markytor, eftersom effektiviteten beror på hur mycket vatten växterna kan ta upp, vilket gör behandling av höga flöden utmanande. Dessutom finns det begränsad kunskap om hur PFAS-förorenat växtmaterial bör hanteras efter skörd. Salixblad innehåller höga koncentrationer av kortkedjiga PFAS och om de inte samlas in innan lövfällningen finns det en risk att PFAS återförs till miljön. En lösning för att minska denna risk är att skörda träden årligen innan bladen faller. Dessa utmaningar visar att även om PHYTO kan förbättra avskiljningen

av PFAS kräver tekniken noggrann hantering för att användas säkert och effektivt.



Den konstruerade våtmarken, strax efter plantering av Salix år 2023.

## Elektrokemisk oxidation



**Elektrokemisk oxidation (EO)** använder bordopade diamant-elektroder för att bryta ner PFAS. När en elektrisk ström passerar genom elektroderna bildas mycket reaktiva oxiderande radikaler på deras yta. Dessa radikaler angriper PFAS-molekylerna och klyver deras starka kolfluorbindningar, vilket omvandlar dem till ofarliga slutprodukter såsom koldioxid (CO<sub>2</sub>) och fluorid (F<sup>-</sup>).

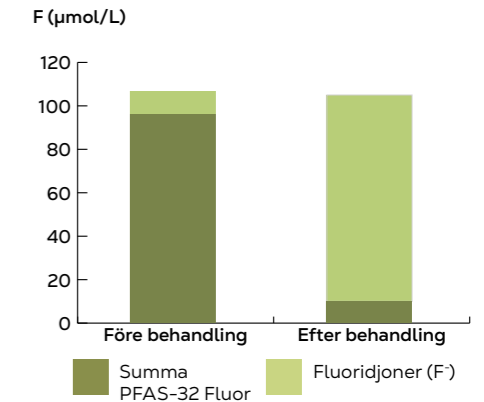
Inom LIFE SOuRCE-projektet användes EO för att förstöra den PFAS som hade koncentrerats i det skum som producerades av SAFF-enheten. Genom att behandla detta mycket koncentrerade avfallsflöde blev processen betydligt mer kostnads- och energieffektiv än att behandla grundvatten direkt med EO. EO destruerade upp till 88 % av PFAS i det insamlade skummet under behandlingsperioden. Längre behandlingstider hade kunnat

öka nedbrytningsgraden ytterligare, men skulle samtidigt ha sänkt energieffektiviteten. I stället återfördes det delvis behandlade avfallet från EO till SAFF-enheten för ytterligare koncentrerering och behandlades sedan på nytt med EO.

För långkedjiga PFAS sågs en omedelbar minskning av halter vid EO-behandling av SAFF-skummet. Kortkedjiga PFAS ökade däremot initialt i den behandlade vätskan, vilket visar att PFAS bryts ner sekventiellt: längre kedjor omvandlas först till kortare, som därefter också bryts ner.

Riktade analyser av PFAS och analyser av fluoridjoner användes för massbalansberäkningar och på så vis

kunde det bekräftas att 97–99 % av fluoratomerna från de nedbrutna PFAS-ämnena omvandlades till fria fluoridjoner i lösningen. Detta visar att kol-fluorbindningarna bryts helt under processen och att nästan all PFAS som sönderdelas blir fullständigt mineraliserad.



## Anjonbyte

**Anjonbyte (AEX)** är en filterbaserad teknik där PFAS fångas upp av anjonbyttarmassor som attraherar negativt laddade molekyler. När vatten passerar genom filtret fastnar PFAS på filtermaterialets yta genom både jonbyte och hydrofoba interaktioner. Vid behov kan vattnet förbehandlas för att avlägsna andra laddade ämnen så att de PFAS-specifika anjonbyttarmassorna kan användas under en längre tid innan de behöver bytas ut eller regenereras.

AEX är effektivt för ett brett spektrum av PFAS, både långkedjiga föreningar som PFOS och PFOA och mer rörliga kortkedjiga PFAS såsom PFPeA och PFHxA. Inom LIFE SOuRCE-projektet uppnåddes avskiljningsgrader över 99 % vid den spanska demonstrationsplatsen baserat på den totala halten av 20 olika PFAS,

inklusive både långkedjiga och kortkedjiga PFAS, särskilt PFOS, PFOA och PFHxA.

Prestandan följde tre typiska faser. Inledningsvis gav anjonbyttarmassan mycket hög avskiljning. Med tiden minskade effektiviteten när massan gradvis blev mättad med PFAS.



Slutligen behövdes regenerering eller utbyte för att återställa behandlingskapaciteten. Dessa mönster visar hur viktigt det är med tydliga underhållsrutiner för att säkerställa fortsatt hög avskiljningsgrad.





## Livscykelanalys (LCA) och Livscykelkostnadsanalys (LCC)

För att bedöma de miljömässiga och ekonomiska aspekterna av behandlingskedjorna som har tillämpats inom LIFE SOuRCE genomfördes en fullständig livscykelanalys (LCA) och livscykelkostnadsanalys (LCC) baserat på verkliga driftdata från de två demonstrationsanläggningarna i Spanien och Sverige. Analyserna jämförde LIFE SOuRCE-systemet med en konventionell behandling baserad på granulerat aktivt kol (GAC), med en funktionell enhet på 1 m<sup>3</sup> behandlat grundvatten och ett "från-vagga-till-grav" systemperspektiv.

LCA-resultaten visade att de miljömässiga konsekvenserna från behandlingskedjorna skilde sig avsevärt mellan de två platserna, främst på grund av skaleffekter och plats-specifika förhållanden. Vid den spanska anläggningen dominerade SAFF-enheten miljöpåverkan. Inte för att tekniken i sig är särskilt resurskrävande, utan för att endast mycket små mängder grundvatten fanns tillgängliga under demonstrationsperioden, vilket gav höga påverkanstal per kubikmeter behandlat vatten. I Sverige, där betydligt större vattenvolymer behandlades och elen huvudsakligen kommer från förnybara källor, var miljöpåverkan betydligt lägre.

På båda platserna bidrog EO endast marginellt till det totala miljöavtrycket. Jämförelsen med GAC-referensen visade att de behandlingskedjor som testades i pilot-skala inom LIFE SOuRCE hade högre påverkan per kubikmeter vatten. Detta berodde främst på att behandlingen genomfördes i begränsad skala och att den utrustning som användes därför var överdimensionerad.

Dessa effekter förväntas förbättras avsevärt vid industriell drift. Ett modellerat scenario för industriell uppskalning bekräftade detta och visade en minskning av miljöpåverkan med cirka 94 % när systemet körs vid full designkapacitet.

LCC-analysen följde samma systemgränser och visade liknande skalrelaterade effekter. Den spanska pilot-anläggningen fick en hög totalkostnad (39 €/m<sup>3</sup>) under demonstrationsperioden eftersom utrustningskostnaderna fördelades över en mycket liten behandlad vattenvolym. Den svenska piloten, som behandlade nästan 28 000 m<sup>3</sup> grundvatten, nådde en kostnad på 0,24 €/m<sup>3</sup>, vilket ligger i nivå med den uppskattade kostnaden för GAC-behandling (0,33 €/m<sup>3</sup>) samtidigt som PFAS destrueras. Att skala upp SAFF+AEX+EO-behandlingen till industriell nivå skulle minska kostnaderna ytterligare till ungefär 0,15 €/m<sup>3</sup> behandlat vatten. I båda piloterna stod SAFF för den största delen av investeringskostnaderna, medan AEX (där det användes) var det mest kostsamma steget under drift på grund av filterbyte och avfallshantering.

Sammantaget visar LCA- och LCC-resultaten att behandlingskedjan SAFF + AEX + EO är en effektiv, skalbar och ekonomiskt konkurrenskraftig lösning för PFAS-sanering, med stark potential för tillämpning i industriella vattenreningssystem och för att stödja utvecklingen av ett säkrare, renare och mer cirkulärt vattenhanteringssystem i Europa.

## Hälso- och miljöriskbedömning

Hälso- och miljörisker kopplade till PFAS i grundvatten bedömdes både före och efter att LIFE SOuRCE-projektets behandlingskedjor hade tillämpats vid de två demonstrationsplatserna: ett industri- och jordbruksområde i Spanien (hälsoriskbedömning), där SAFF, AEX och EO användes, samt ett svenskt vattendrag (miljöriskbedömning), där SAFF, PHYTO och EO tillämpades.

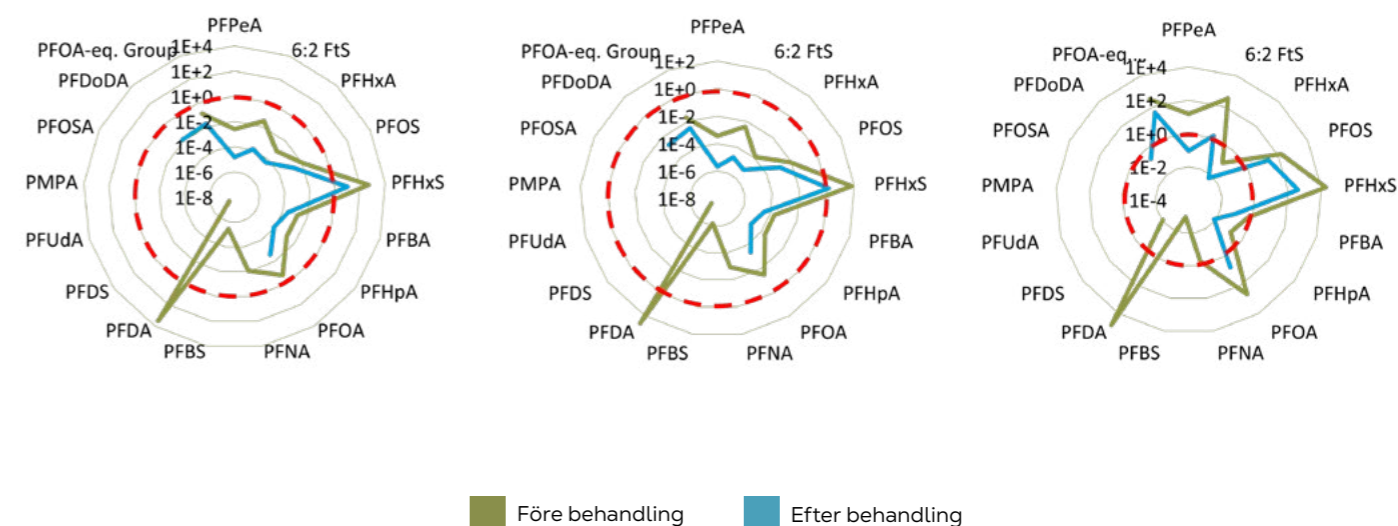
I hälsoriskbedömningen analyserades två exponerings-scenarier. Det första scenariot avsåg industriarbetare som kan exponeras för PFAS-förorenat vatten genom intag eller hudkontakt vid rengöringsarbete, till exempel vid tvätt av utrustning eller fordon. Det andra scenariot omfattade två skyddsobjekt: lantbrukare som kan exponeras genom intag och hudkontakt med bevattningsvatten, samt allmänheten, uppdelad i vuxna och barn, som kan exponeras genom konsumtion av grödor (sallad) som innehåller PFAS till följd av bevattning med förorenat vatten. För denna grupp identifierades intag via föda som den huvudsakliga exponeringsvägen.

I miljöriskbedömningen utvärderades risker för sötvatten-ekosystemet i ytvattnet nedströms den svenska demonstrationsplatsen.

Båda demonstrerade behandlingskedjorna, som kombinerade SAFF och EO med antingen AEX eller PHYTO, reducerade PFAS-relaterade risker betydligt, med mer än 98 % riskminskning för människors hälsa och 52–60 % riskminskning för miljön.

Riskbedömningen, baserad på PFAS-halter i det behandlade vattnet jämfört med grundvattenhalterna före behandling, visade tydliga riskminskningar, även om de slutliga risknivåerna fortfarande överskred accepterade gränsvärden (cancerogen risk under 1×10<sup>-5</sup>, icke cancerogent faroindex under 1 samt ekologiska toxicitetsenheter under 1).

Sammanfattningsvis visar resultaten att de testade behandlingskedjorna är mycket effektiva för att minska PFAS-relaterade risker i det uppumpade grundvattnet och att de även har potential att minska riskerna i nedströms liggande grund- och ytwater vid tillämpning i full skala. Detta stärker projektets slutsats att de testade kombinationerna av tekniker (SAFF + AEX/PHYTO + EO) utgör en skalbar och konkurrenskraftig metod för PFAS-sanering, som bidrar till en säkrare och mer cirkulär vattenhantering i Europa.



Bedömning av hälsorisker för a) industriarbetare i scenario 1 (vänster), b) lantbrukare i scenario 2 (mitten), och c) barn som äter grönsaker i scenario 2 (höger). Den röda streckade linjen visar acceptansgränsen (HQ = 1 där HQ står för Hazard Quotient, dvs. faroindex). Observera att de radiella axlarna är i logaritmisk skala.

# Slutsatser och framtida utmaningar

## Överförbarhet av projektresultat

LIFE SOuRCE-projektet demonstrerade praktiska lösningar för sanering av PFAS-förorenat grundvatten, som kan tillämpas vid olika typer av förorenade platser runt om i Europa.

Den flexibla behandlingskedjan, som bygger på en kombination av flera olika behandlingstekniker, gör det möjligt att anpassa lösningarna till varierande grundvattenförhållanden, olika PFAS-föreningensprofiler samt gällande regelverk och krav. Teknikerna testades under verkliga förhållanden, vilket bekräftar att de fungerar under olika miljö- och driftförhållanden. Projektet har därmed bidragit med praktisk kunskap och vägledning som gör det möjligt för olika aktörer att använda de demonstrerade lösningarna även vid andra PFAS-förorenade platser i Europa.

## Bedömning av nyttor och effekter

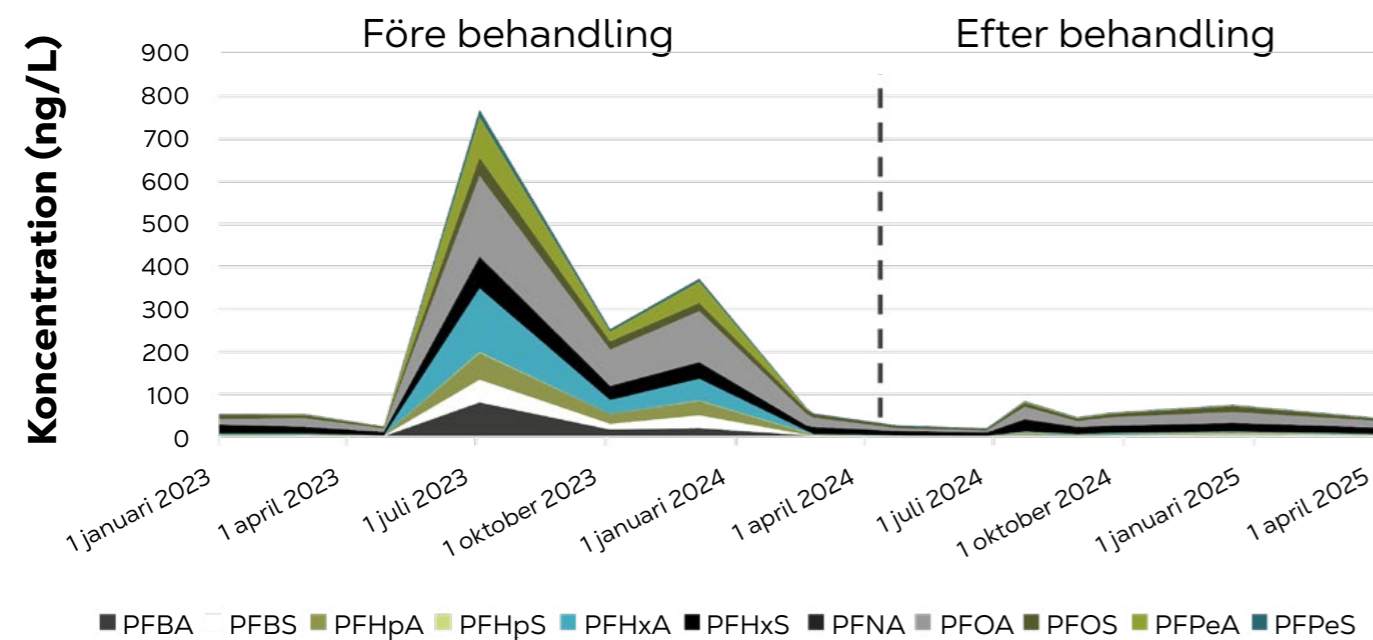
Projektet har visat att det finns teknik tillgänglig som kan separera och destruera både långkedjiga och kortkedjiga PFAS-föreningar till en rimlig kostnad jämfört med konventionella behandlingsmetoder som granulärt aktivt kol (GAC). Den slutliga utformningen av behandlingskedjan beror dock i hög grad på platsspecifika faktorer, såsom den vattenvolym som ska behandlas, sammansättningen av inkommande vatten och de gränsvärden eller riktvärden som ska uppnås. Utöver de tekniska resultaten ger projektet värdefull kunskap till vattenmyndigheter,

verksamhetsutövare och beslutsfattare. Resultaten stärker möjligheterna till välgrundade beslut kring grundvatten-sanering och bidrar till EU:s miljömål kopplade till vattenkvalitet och minskad kemikaliebelastning.

## Framtida utmaningar

PFAS-föreningar utgör en långsiktig utmaning på grund av ämnens extrema persistens och den pågående användningen av PFAS. Ur ett tekniskt perspektiv bör framtida insatser fokusera på att skala upp kostnads-effektiva och hållbara regenereringsmetoder för anjonbytarmassor (AEX), som är särskilt viktiga för att avskilja kortkedjiga PFAS. Utöver detta har användning av tillsatser (tensider) i SAFF-processen, som testats i full skala inom LIFE SOuRCE, visat potential att ytterligare öka avskiljningen av kortkedjiga PFAS. Denna metod bör utvärderas vidare i framtida studier för storskalig tillämpning.

En generell utmaning vad gäller sanering av PFAS är kopplat till analysmetoder för PFAS. Dagens metoder kan ännu inte fullt ut detektera och kvantifiera hela spektrumet av kända PFAS, deras prekursorer (föregångarämnen) och nya PFAS som produceras. Slutligen måste tekniska lösningar anpassas till föränderliga regelverk och förvaltningssystem, som skiljer sig mellan regioner och ställer ytterligare krav på övervakningsstrategier, behandlingsmål och tidsramar för genomförande.



Koncentration av PFAS i grundvatten provtaget i en punkt nedströms den svenska demonstrationsplatsen.

## Kunskapspridande aktiviteter

Projektets resultat har spridits brett för att öka medvetenheten om PFAS-föreningar och tillgängliga behandlingstekniker. Mer än 2 000 personer har nåtts via projektets webbplats, sociala medier och olika nätverk. Intressenter har även engagerats genom webinarier, möten och studiebesök på LIFE SOuRCE demonstrationsplatser i Spanien och Sverige.



Studiebesök vid den svenska demonstrationsplatsen.

## Resultat från demonstrationsplatserna:

- **SAFF + PHYTO** avlägsnade nästan 100 %, av långkedjiga och 61 % av kortkedjiga PFAS. Tester med tillsats av skumbildande tensider visade stor potential att öka avskiljningseffektiviteten för kortkedjiga PFAS.

- **SAFF + AEX** avlägsnade 99 % av långkedjiga och 92 % av kortkedjiga PFAS och är ett mer hållbart alternativ än SAFF + PHYTO, eftersom jonbytarmassorna kan regenereras och EO kan behandla både SAFF-koncentrat och extrakt från AEX-regenerering.

- **88 % av allt fluor i PFAS-ämnena bröts ned** till fluoridjoner med EO under behandlingstiden. En fluormassbalans bekräftar att nedbrutna PFAS mineraliserades.

- **Behandlingskostnaderna** är jämförbara med en behandling med granulärt aktivt kol (GAC), cirka 0,15 €/m<sup>3</sup> behandlat vatten.



# Projektpartner

**Fundació Eurecat (projektkoordinator)**

**Envytech Solutions AB**

**ESOLVE Consultoría e Ingeniería Medioambiental S.L.**

**Laqua Treatment AB**

**Nova Diamant AB**

**Statens geotekniska institut (SGI)**

**Sveriges lantbruksuniversitet (SLU)**

**Uppsala Vatten och Avfall AB (UVA)**



## Kontakt

[info@eurecat.org](mailto:info@eurecat.org)

[LIFE\\_SOURC@eurecat.org](mailto:LIFE_SOURC@eurecat.org)

[www.life-source.se](http://www.life-source.se)

*Bilderna i denna rapport har tagits fram av de deltagande organisationerna, hämtats från Adobe Stock eller skapats med AI verktyget Google Gemini Nano Banana Pro.*

