Avinor AS

Oppdatert vurdering av tiltaksmetoder og kostnader

Gammel brannstasjon (GBS)

Tromsø lufthavn

Oppdragsnr.: **5205614** Dokumentnr.: **ENTC-RIM21** Versjon: **J03** Dato: **2025-06-01**



Norconsult

Oppdragsgiver:	Avinor AS
Oppdragsgivers kontaktperson:	Ijaz Ahmed
Rådgiver:	Norconsult Norge AS, Kjørboveien 22, NO-1337 Sandvika
Oppdragsleder:	Aina Marie Nordskog
Fagansvarlig:	Annelene Pengerud og Lars Været
Andre nøkkelpersoner:	Florian Wagner, Audun Søyland Teie

Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent
J03	2025-06-01	For bruk	Lars Været Annelene Pengerud	Aina Nordskog	Aina Nordskog
B02	2025-05-15	For kommentar	Lars Været Annelene Pengerud	Aina Nordskog	Aina Nordskog
A01	2025-05-12	For fagkontroll	Lars Været Annelene Pengerud	Aina Nordskog	Aina Nordskog

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

Sammendrag

Avinor ble i mai 2021 pålagt av Miljødirektoratet å utarbeide en tiltaksplan for opprydding i PFAS-forurenset grunn ved Tromsø lufthavn. Tiltaksplan for Tromsø lufthavn, som omfattet PFAS-forurensning på hele lufthavnen, ble oversendt Miljødirektoratet 1. mai 2024.

Miljødirektoratet oversendte den 5. september 2024 et varsel om pålegg om å gjøre tiltak i PFAS-forurenset grunn ved Tromsø lufthavn. I varsel om pålegg signaliserer Miljødirektoratet at Avinor vil pålegges å gjennomføre de foreslåtte tiltakene ved lufthavnen slik de er beskrevet i tiltaksplanen. Miljødirektoratet vurderte å sette fristen for gjennomføring av tiltaket ved gammel brannstasjon (GBS) til 31. desember 2025.

I Avinors svar på varsel om pålegg 11. november 2024 ble det forslått å utsette frist for igangsetting av tiltak til oktober 2026, med bakgrunn i identifisert behov for å fremskaffe mer informasjon som grunnlag for prosjektering og detaljering av tiltaket. Miljødirektoratet har gjennom sitt pålegg 13. april 2025 om gjennomføring av tiltak ved gammelt brannøvingsfelt (BØF2) hensyntatt dette behovet, og vil avvente pålegg om tiltak ved denne lokaliteten til nødvendig prosjektering er gjennomført. Den varslede fristen om gjennomføring av tiltak ved GBS innen 31. desember 2025 faller derfor bort.

Metoder som er vurdert som aktuelle ved GBS er; (1) oppsamling og rensing av grunnvann med utslipp til sjø (2) reaktiv barriere nedstrøms det forurensede området. Det er for disse tiltaksmetodene beregnet kostnader for en levetid på hhv. 10 og 20 år, i all hovedsak på skissenivå. Det legges til grunn at begge tiltaksalternativ skal avskjære forurenset grunnvann, med lik utstrekning normalt på grunnvannets strømningsretning, og at effekt over tid er lik for de to tiltakene innenfor et 10 og 20-års perspektiv.

Basert på en samlet vurdering av kostnader, risiko og muligheter anbefaler Norconsult at det etableres en pilot for reaktiv barriere som spredningsreduserende tiltak ved gammel brannstasjon (GBS) på Tromsø lufthavn, med mål om at denne videreføres til fullskala barriere dersom resultater fra piloten viser at dette kan være en egnet løsning og gi tilstrekkelig effekt i form av spredningsreduksjon.

Det bemerkes at Norconsult anerkjenner usikkerheter knyttet til foreslått metode, særlig knyttet til begrenset dokumentasjon av langtidseffekt sammenliknet med vannrensing som er en vel utprøvd og anerkjent metode. Norconsult er imidlertid av den oppfatning at GBS er en egnet lokalitet for å teste ut metoden som spredningsreduserende tiltak. Dette blant annet fordi risikoen anses begrenset da hovedandelen av forurensningen ligger i umettet sone under asfaltert areal.

For å ha noe å falle tilbake på dersom reaktiv barriere gjennom pilot ikke viser seg å være egnet ved GBS, kan en mulighet være å gjennomføre pilot både for barriere og rensing av grunnvann. Dette innebærer ikke en større merkostnad, og man vil gjennom dette kunne fremskaffe et godt grunnlag for valg av endelig løsning og videre prosjektering.

Innhold

1 Bakgrunn 5
1.1 Utarbeidet tiltaksplan 2024 5
1.2 Varsel om pålegg fra Miljødirektoratet 5
1.3 Formål med denne rapporten 6
2 Oppdatert vurdering av aktuelle tiltaksmetoder 7
2.1 Supplerende undersøkelser 7
2.2 Rensing av grunnvann 8
2.3 Reaktiv barriere 9
3 Kostnader 10
3.1 Rensing av grunnvann 10
3.1.1 Kostnader tiltaksplan (skisseprosjekt) 10
3.1.2 Oppdaterte kostnader etter supplerende undersøkelser 10
3.2 Reaktiv barriere 11
3.2.1 Forutsetninger 11
3.2.2 Kostnader 11
4 Anbefaling tiltaksmetode 12
4.1 Generelle vurderinger 12
4.2 Anbefalt alternativ for videre prosjektering 12
5 Referanser 14
6 Vedlegg 15

1 Bakgrunn

1.1 Utarbeidet tiltaksplan 2024

Avinor ble i mai 2021 pålagt å utarbeide tiltaksplan for opprydding i PFAS-forurenset grunn ved Tromsø lufthavn [1]. Opprinnelig gjaldt pålegget utarbeidelse av tiltaksplan for brannøvingsfeltene (BØF1 og BØF2) og området ved gammel brannstasjon (GBS), med krav om en plan for videre kartlegging av lufthavnen og overvåkning av planlagte tiltak. Dette vedtaket ble i oktober 2023 omgjort av Miljødirektoratet [2] til å gjelde utarbeidelse av en tiltaksplan for hele lufthavnen, i tråd med oppdaterte krav til tiltaksplaner [3]. Tiltaksplan for Tromsø lufthavn ble oversendt Miljødirektoratet 1. mai 2024.

Tiltaksplanen er utarbeidet i to separate deler [4] [5]:

Del 1: Tiltaksplanens del 1 er en sammenstilling av resultater fra utførte undersøkelser av PFAS i jord, vann og biota ved Tromsø lufthavn, og en risikovurdering for helse og miljø som følge av spredning fra PFAS-forurenset grunn ved lufthavnen. Tiltaksplanens del 1 svarer ut krav 1 og 2 i Miljødirektoratets pålegg.

Del 2: Tiltaksplanens del 2 er en redegjørelse for aktuelle tiltaksmetoder, kostnadsberegninger og foreslåtte tiltak ved de lokaliteter som gjennom utførte undersøkelser og risikovurdering er funnet å utgjøre de største kildene til spredning av PFAS fra Tromsø lufthavn. Tiltaksplanens del 2 svarer ut krav 3–6 i Miljødirektoratets pålegg.

Gjennom kartlegging av historisk bruk av brannskum på Tromsø lufthavn [6], samt omfattende kartlegging av jord, vann og biota ved lufthavnen, var det fire områder som pekte seg ut som de største kildene i jord, og de største kildene til spredning av PFAS fra lufthavnen:

- Sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF1)
- Gammelt brannøvingsfelt (BØF2)
- Gammel brannstasjon og deice-området (GBS)
- Utfylt område ved Ørneveien (UOØ)

For en nærmere beskrivelse av Tromsø lufthavn og forurensningssituasjon ved de aktuelle lokalitetene, vises det til tiltaksplanens del 1, samt resultatrapporter for de enkelte lokalitetene som er undersøkt: [4] [7] [8] [9] [10] [11].

Basert på gjennomgang av forurensingssituasjonen, vurdering av aktuelle tiltaksmetoder og tilhørende kostnader, ble det for gammel brannstasjon (GBS) foreslått et tiltak med oppsamling og rensing av vann med konsentrasjon av ∑PFAS > 1000 ng/l.

1.2 Varsel om pålegg fra Miljødirektoratet

Miljødirektoratet oversendte den 5. september 2024 et varsel om pålegg om å gjøre tiltak i PFAS-forurenset grunn ved Tromsø lufthavn [12]. Der signaliserer Miljødirektoratet at Avinor vil pålegges å gjennomføre de foreslåtte tiltakene ved lufthavnen slik de er beskrevet i tiltaksplanen. Miljødirektoratet etterspurte også noe tilleggsinformasjon til de foreslåtte tiltakene, som grunnlag for å kunne stille krav i det endelige pålegget. Miljødirektoratet vurderte å sette fristen for gjennomføring av tiltaket ved gammel brannstasjon (GBS) til 31. desember 2025.

I Avinors svar på varsel om pålegg 11. november 2024 ble det forslått å utsette frist for igangsetting av tiltak til oktober 2026, med bakgrunn i identifisert behov for å fremskaffe mer informasjon som grunnlag for prosjektering og detaljering av tiltaket. Miljødirektoratet har gjennom sitt pålegg 13. april 2025 om

gjennomføring av tiltak ved gammelt brannøvingsfelt (BØF2) hensyntatt behovet for å utsette frist for GBS, og vil avvente pålegg om tiltak ved denne lokaliteten til nødvendig prosjektering er gjennomført. Den varslede fristen om gjennomføring av tiltak ved GBS innen 31. desember 2025 faller derfor bort.

1.3 Formål med denne rapporten

Formålet med denne rapporten er å gi en oppdatert vurdering av aktuelle spredningsreduserende tiltak for gammel brannstasjon (GBS), herunder (1) tiltak med rensing av grunnvann, og (2) tiltak med etablering av reaktiv barriere nedstrøms det forurensede området. Rapporten gir en overordnet oppsummering av resultater fra supplerende undersøkelser utført i 2024/2025, hvor resultater fra disse undersøkelsene er benyttet for oppdaterte beregninger av kostnader og effekt for aktuelle tiltak.

Det har i etterkant av utarbeidet tiltaksplan vært dialog med leverandører av de aktuelle tiltaksløsningene, herunder ECT2 for vannrensing og Regenesis for reaktiv barriere. De løsninger som er lagt til grunn for oppdaterte kostnadsberegninger, er da i stor grad basert på innspill og dialog med disse leverandørene. Det er også mottatt priser på aktuelle løsninger fra leverandørene som er benyttet som grunnlag for kostnadsberegninger.

Begge de to alternative tiltaksløsningene er per i dag utredet på skissenivå, med behov for videre detaljering gjennom forprosjekt og detaljprosjekt. Vurderingene i denne rapporten er ment å tjene som et beslutningsgrunnlag for Avinor med tanke på hvilket alternativ man tar videre til forprosjekt.

For begge alternativene gjelder at gjennomføring av en pilot for å teste ut metoden i mindre skala på lokaliteten er klart anbefalt. Slike pilotforsøk vil kunne gjennomføres i en tidlig forprosjektfase, og vil da kunne gi et nyttig dokumentasjonsgrunnlag for valg av metode og videre prosjektering av endelig løsning.

2 Oppdatert vurdering av aktuelle tiltaksmetoder

Ved gammel brannstasjon (GBS) er det estimert om lag 18,9 kg PFAS i jord, hvor hovedandelen ligger i umettet sone under asfaltdekke for avisning og flyoppstilling. Med bakgrunn i vurdering av egnethet for ulike tiltaksmetoder for GBS konkluderte tiltaksplanen med tre aktuelle tiltaksmetoder for lokaliteten; 1) oppgraving med ekstern deponering, 2) oppgraving med vasking av masser og 3) rensing av grunnvann. Gitt en situasjon med hovedandel av forurensing i umettet sone under asfaltert område for avisning og flyoppstilling, der forurensingen er lite tilgjengelig for oppgraving, ble det i tiltaksplanen anbefalt spredningsreduserende tiltak nedstrøms lokaliteten gjennom oppsamling og rensing av grunnvann.

I den innledende vurderingen av egnethet for ulike tiltak ble også spredningsreduserende tiltak i form av reaktiv barriere vurdert. Grunnet usikkerhet knyttet til langtidseffekt, og om bundet PFAS vil kunne lekke ut igjen over tid, ble denne tiltaksmetoden i tiltaksplanen vurdert som lite aktuell. I forbindelse med prosjektering av tiltak ved gammelt brannøvingsfelt (BØF2) ble det imidlertid gjennomført en ny vurdering av egnethet for ulike tiltaksmetoder for denne lokaliteten, herunder løsning med reaktiv barriere [13]. Som følge av dette arbeidet, herunder dialog med aktuell leverandør av løsningen, ble løsning med reaktiv barriere som spredningsreduserende tiltak også ved gammel brannstasjon (GBS) aktualisert. Det ble derfor besluttet å vurdere egnethet for denne løsningen på nytt også for GBS.

2.1 Supplerende undersøkelser

Det ble i tiltaksplanen pekt på behov for supplerende undersøkelser for videre prosjektering av tiltak med oppsamling og rensing av grunnvann, herunder blant annet avgrensing av forurensning i utstrømmende grunnvann, strømningsretning, strømningsgradient, fluktuasjoner i grunnvannsnivå og forholdet til nedstrøms overvannstrase. Videre ble det pekt på utfordrende grunnvannskjemi, blant annet som følge av påvirkning fra flyavisingskjemikalier, som ville kunne påvirke valg og utforming av prosessløsning for vannrenseanlegget, og derigjennom kostnadsbildet. Det ble derfor anbefalt å fremskaffe bedre grunnlag for vurderinger av andre relevante vannkvalitetsparametere utover PFAS som kan ha betydning for valg av prosessløsning, eks. avisingskjemikalier, organisk materiale, jern/mangan mm.

Det ble i november 2024 etablert 11 supplerende miljøbrønner ved GBS, med samtidig uttak av prøver for kornfordeling i utvalgte borpunkter nedstrøms lokaliteten. En av brønnene ble etablert i omfyllingsmasser for nedstrøms overvannstrase for å dokumentere vannkvalitet i denne. Det ble også installert automatiske loggere for grunnvannsnivå i utvalgte brønner for å dokumentere variasjon i grunnvannstand over tid. Samtlige brønner på GBS er fulgt opp med uttak av vannprøver i januar og april 2025, i tillegg til uttak av vannprøver tilknyttet overvannssystemet nedstrøms lokaliteten i april 2025.

Undersøkelsene har gitt grunnlag for å skissere avgrensning av spredningsreduserende tiltak normalt på strømningsretningen, der det for løsningen legges til grunn oppsamling og rensing av grunnvann med konsentrasjoner av ∑PFAS >1000 ng/l. Prøvegrunnlaget gir også sterke indikasjoner på at overvannstrase som ble etablert nedstrøms lokaliteten i 2020 virker avskjærende på grunnvannsstrøm mot sjø, og fungerer som foretrukken strømnings- og spredningsvei for PFAS-forurenset grunnvann. Dette påvirker lokalisering/utforming av fremtidig spredningsreduserende tiltak. Videre er dokumentasjonsgrunnlaget omkring forventet variasjon i grunnvannstand, og derigjennom andel av forurensing over/under grunnvannstand, styrket. Dette grunnlaget forventes ytterligere styrket gjennom fortsatt overvåkning gjennom smelteperioden våren 2025.

Resultater fra kornfordelingsanalyser har understøttet antagelsen om at identifisert skjellsandlag har vesentlig høyere permeabilitet enn stedlig underliggende mineraljord (siltig/sandig materiale), og også betydelig høyere enn i overliggende fyllmasser (se prinsippskisse i Figur 2-1). Det forventes derfor at spredning i stor grad er knyttet til vannstrømning i skjellsandlaget, og at spredningsreduserende tiltak derfor

må rettes mot grunnvann helt ned til underliggende mineraljord. Spredningsberegninger er oppdatert med bakgrunn i resultater fra supplerende undersøkelser. Med et oppdatert spredningsestimat i størrelsesorden 0,5 kg/år er spredningsestimatet for dagens situasjon vesentlig redusert sammenliknet med tiltaksplanen (1-1,2 kg/år), hovedsakelig med bakgrunn i oppdaterte tall for hydraulisk ledningsevne (beregnet fra supplerende kornfordelingsanalyser) og en noe lavere forventet strømningsgradient.



Figur 2-1: Prinsippskisse for grunnforhold ved gammel brannstasjon (GBS). Blå stiplet linje angir forventet grunnvannstand. Grunnvannstand vil variere gjennom året.

Analyseresultater for grunnvannsprøver tatt som del av supplerende undersøkelser viser at det fortsatt må forventes en dels kompleks og utfordrende grunnvannskjemi på lokaliteten. Påviste konsentrasjoner av avisingskjemikalier (propylenglykol, formiat) har generelt vært lave ved månedlige prøvetakinger gjennom vinter/tidlig vår 2025, noe som kan tyde på en avtakende belastning på grunn og grunnvann sammenliknet med tidligere, men en lengre tidsserie vil være nødvendig for å bekrefte om så faktisk er tilfelle.

Resultater for andre analyseparametere tilsier imidlertid at grunnvannskjemien og forholdene i grunnen er sterkt påvirket av tidligere tilførsler av avisingskjemikalier. Det er gjennomgående målt høye konsentrasjoner av organisk stoff (målt som løst organisk karbon, DOC), sammen med høye konsentrasjoner av oppløst jern (Fe) og mangan (Mn). Dette tilsier reduserende forhold i grunnvannet, noe som også bekreftes av høye konsentrasjoner av metan (CH_4) i grunnvannet.

2.2 Rensing av grunnvann

I tiltaksplanen [5] ble det for et tiltak med rensing av grunnvann lagt til grunn en løsning med oppsamling og rensing av grunnvann med konsentrasjoner av ∑PFAS >1000 ng/l. Det ble for kostnadsberegninger lagt til grunn konvensjonell prosessløsning med forbehandlingstrinn i form av sandfilter, og filtrering gjennom aktivt kull og/eller ionebytter for fjerning av PFAS. Det ble videre pekt på en forventet utfordrende vannkjemi og

mangelfullt dokumentasjonsgrunnlag for vurderinger av egnet prosessløsning og omfang av nødvendige forbehandlingstrinn, og tilhørende kostnader.

En renseløsning som baserer seg på fjerning av PFAS gjennom filtrering gjennom aktivt kull eller annet filtermedium (eks. ionebytter), vil være avhengig av at innkommende vann på filtreringstrinnet i liten grad inneholder partikulært materiale som vil kunne tette porene i filtermediet, eller oppløste stoffer som vil kunne konkurrere med PFAS om bindingsplasser på filtermediet. Et høyt innhold av et slike stoffer vil kunne medføre behov for hyppig skifte av filtermedium, noe som over tid vil være svært kostnadsdrivende.

Det har de senere år kommet ulike produkter på markedet som fungerer ved å felle ut PFAS fra vannfasen gjennom flokkulering, uten å basere seg på filtrering. Et eksempel på et slikt produkt er Fluorflok, som leveres av vannrenseleverandøren ECT2. For å fremskaffe et bedre grunnlag for videre vurderinger av egnet prosessløsning for vannrensning ved GBS, ble det derfor vinteren 2025 gjennomført et labforsøk med testing av Fluorflok for rensing av grunnvann ved lokaliteten. Dette forsøket ble utført ved at ECT2 fikk tilsendt grunnvann fra lokaliteten (10 liter batch), som ble benyttet for testing av ulik dosering av Fluorflok med tanke på fjerning av PFAS.

Resultater fra labforsøket viste at tilsetting av Fluorflok vil kunne ha en god effekt med tanke på fjerning av PFAS i grunnvannet ved GBS, der resultatene fra labforsøket viste 94-98% reduksjon i konsentrasjon av ∑PFAS, avhengig av dosering av Fluorflok og benyttet koagulant.

Resultater fra dette labforsøket viser at Fluorflok eller annet tilsvarende flokkuleringsmiddel kan være et egnet alternativ for fjerning av PFAS fra grunnvannet ved GBS. En prosessløsning som baserer seg på fjerning av PFAS ved bruk av Fluorflok alene, uten filtermedium eller annet supplerende rensetrinn, vil imidlertid ha en svært høy forventet kostnad, grunnet svært høy produktpris for Fluorflok. Bruk av denne type flokkuleringsmiddel vil imidlertid kunne vurderes i kombinasjon med annet rensetrinn for den endelige prosessløsningen for rensing av grunnvann ved lokaliteten. Bruk av Fluorflok i forkant av et filtreringstrinn, vil da kunne bidra til å redusere den totale belastningen av PFAS inn på filtermediet, noe som vil kunne øke filterets levetid og redusere behov for bytte av filtermedium.

Rapport fra labforsøket utført av ECT2 er gitt i Vedlegg 2.

2.3 Reaktiv barriere

I likhet med oppsamling for rensing av grunnvann, vil en løsning med reaktiv barriere basere seg på avskjæring av grunnvannsstrøm før den når resipient. Utstrekning vil i så måte være lik, og definert av kommende krav i pålegg fra Miljødirektoratet.

Tiltaksløsningen innebærer injeksjon av sorbent (kolloidalt aktivt kull i suspensjon) i mettet sone (under grunnvannsnivå) og kapillærsonen for å etablere en reaktiv barriere normalt på grunnvannets strømningsretning. Denne barrieren vil da bestå av en sorbent som vil binde PFAS i grunnvannet som strømmer gjennom barrieren, og derigjennom holde tilbake forurensing fra å nå resipient. Etablering av barrieren innebærer bruk av borerigg for injeksjon av sorbent.

Vurderinger av reaktiv barriere som tiltaksmetode og kostnader for denne er basert på dialog og priser mottatt fra Regenesis. Det er for denne tiltaksløsningen få aktuelle leverandører i markedet. Dette er også en relativt ny og mindre utprøvd tiltaksløsning, med mangelfull dokumentasjon særlig med tanke på langtidseffekt og faktisk "levetid" for løsningen.

Det er gjennomført dialogmøter med Regenesis i flere omganger for å utrede mulighet for å etablere reaktiv barriere som spredningsreduserende tiltak ved gammel brannstasjon (GBS), samt jobbe frem et kostnadsestimat for et slikt tiltak.

3 Kostnader

Estimerte kostnader for spredningsreduserende tiltak ved gammel brannstasjon (GBS) på Tromsø lufthavn er oppdatert basert på resultater fra supplerende undersøkelser og informasjon fra dialog med leverandører av aktuelle tiltaksløsninger. Kostnader er beregnet på skissenivå.

I tiltaksplanen ble effekt for et tiltak med rensing av grunnvann beregnet med bakgrunn i estimert spredningsmengde for dagens situasjon, tillagt utlekking fra umettet sone, og en forventet tiltakseffekt på 90 %. Dette innebærer størst effekt de første årene av tiltaket, frem til beregnet mengde i mettet sone (ca. 4 kg) er behandlet gjennom tiltaket. Forventet effekt etter hhv. 10 og 20 år var i tiltaksplanen 4,4 og 5,4 kg.

Lys av resultater fra supplerende undersøkelser er spredningsestimat for dagens situasjon justert ned jf. kap. 2.1, samt at forventet utlekking fra umettet sone er redusert som følge av reasfaltering og liten grad av infiltrasjon. Oppdatert forventet effekt for første 10 år (4,4 kg) av spredningsreduserende tiltak påvirkes lite, da estimert spredning fortsatt er relativt høy relativt til estimert mengde i jord i mettet sone, mens forventet effekt etter 20 år (5,0 kg) forventes noe redusert sammenliknet med tiltaksplanen som følge av lavere estimert utlekking under asfaltert areal.

3.1 Rensing av grunnvann

3.1.1 Kostnader tiltaksplan (skisseprosjekt)

I tiltaksplanen [5] ble det for gammel brannstasjon (GBS) utarbeidet et kostnadsestimat på skissenivå for tiltak med oppsamling og rensing av grunnvann («pump & treat»). Beregnet basiskostnad (nåverdi) for et vannrenseanlegg med kapasitet 5 l/s og varighet av tiltaket på 10 og 20 år var i tiltaksplanen på hhv. 34,4 og 41,9 MNOK, med forventet effekt på hhv. 4,4 og 5,4 kg.

3.1.2 Oppdaterte kostnader etter supplerende undersøkelser

Oppdaterte kostnader for et tiltak med rensing av grunnvann er basert på resultater fra supplerende undersøkelser, samt dialog og priser mottatt fra vannrenseleverandøren ECT2. Det er for kostnadsberegninger lagt til grunn en prosessløsning bestående av følgende rensetrinn:

1. Utlufting for å drive ut metan (CH_4) og hydrogensulfid (H_2S)
2. Oksidasjonstrinn for å felle ut oppløst jern (Fe) og mangan (Mn)
3. Partikkelfjerningstrinn (sandfilter eller annet granulært medium)
4. Filtrering gjennom filter bestående av aktivt kull og/eller ionebytter for fjerning av PFAS

I lys av supplerende undersøkelser er kapasitetsbehov for vannrenseanlegget nedjustert for oppdatert kostnadsestimat (3 l/s) sammenliknet med tilsvarende estimat i tiltaksplanen (5 l/s).

Beregnet basiskostnad (nåverdi) for et vannrenseanlegg med kapasitet 3 l/s og varighet av tiltaket på 10 og 20 år er hhv. 38,3 og 47,9 MNOK, med forventet effekt på hhv. 4,4 og 5,0 kg. Med bakgrunn i supplerende undersøkelser er årlig spredning nedjustert sammenliknet med tiltaksplanen, men fortsatt i en størrelsesorden som tilsier at premissene i tiltaksplanen for forventet effekt etter hhv. 10 og 20 år opprettholdes.

3.2 Reaktiv barriere

3.2.1 Forutsetninger

Kostnadsestimat baserer seg på «*preliminary estimate*» mottatt fra Regenesis 27. april 2025. Det er i kostnadsestimatet inkludert følgende hovedelementer:

- Designverifikasjonstest (nivåspesifikke målinger av grunnvannshastighet og masseflux) gjennom passive prøvetakere
- Pilot
- Fullskala barriere

Leverandør forutsetter både designverifikasjonstest og pilot for endelig utforming av fullskala barriereløsning.

Øvrige forutsetninger lagt til grunn for kostnadsestimat på skissenivå:

- Uspesifiserte kostnader 20%, rigg og drift 15%
- Regner kun på kostnader frem til og med år 20
- Antatt ingen behov for reinjeksjon av sorbent i perioden
- Ingen behov for senere oppgraving og ekstern deponering av barrieren
- Omregning fra Euro til NOK, 1 Euro = 11,29 NOK

3.2.2 Kostnader

Estimerte kostnader for ulik varighet for reaktiv barriere som spredningsreduserende tiltak ved gammel brannstasjon (GBS) på Tromsø lufthavn er oppsummert i Tabell 3-1.

Tabell 3-1: Beregnet totalkostnad (styringsmål P50) (mest sannsynlige kostnad) på skissenivå for alternativ tiltaksmetode med reaktiv barriere ved gammel brannstasjon (GBS) på Tromsø lufthavn.

Varighet	Kostnad (NOK)	Effekt (kg)	Kost/effekt (NOK/kg)
10 år	33 900 000	4,4	7 700 000
20 år	33 900 000	5,0	6 800 000

4 Anbefaling tiltaksmetode

4.1 Generelle vurderinger

I Vedlegg 1 er en matrise som sammenstiller risiko og muligheter ved de to alternative tiltaksløsningene for spredningsreduserende tiltak ved gammel brannstasjon (GBS) på Tromsø lufthavn. Matrisen oppsummerer kostnader, risiko og muligheter ved tiltaksmetodene, samt estimert effekt av tiltakene.

Den viktigste forskjellen mellom de to løsningsalternativene er at der en løsning med rensing av grunnvann krever driftsinnsats gjennom hele tiltakets varighet, med tilhørende kostnader, så er reaktiv barriere en passiv løsning som ikke krever drift og vedlikehold innenfor forventet varighet av tiltaket. En barriereløsning krever ingen fysiske installasjoner over terreng utover overvåkningsbrønner, mens vannrenseanlegg krever permanent bygg og tilhørende infrastruktur i grunnen (oppsamlings- og utslippsløsning, vann og elektrisitet) som forventes omfattet av mulig tidkrevende søknadsprosess.

Begge de vurderte løsningene forventes å ha nokså lik spredningsreduserende effekt etter hhv. 10 og 20 års varighet. Begge tiltaksmetoder er rettet mot forurensing i mettet sone, og vil ha begrenset effekt på gjenværende mengde i umettet sone hvor infiltrasjon og utlekking er svært begrenset som følge av asfaltert dekke på store deler av det forurensede området. Det er beregnet en total mengde PFAS i umettet sone innenfor asfaltert areal på om lag 11,9 kg, som i liten grad vil omfattes av spredningsreduserende tiltak. Dette betyr at det for begge tiltaksalternativene vil være en betydelig gjenliggende forurensning på lokaliteten som vil måtte håndteres ved eventuelle fremtidige terrenginngrep.

Felles for begge tiltaksmetoder er usikkerhet knyttet til innkommende vannkvalitet over tid som kan påvirke driftskostnader (vannrensing), levetid og behov for reinjeksjon (barriereløsning). Kostnadsestimat for begge løsninger bygger på samme dokumentasjonsgrunnlag, der vannkvalitet er vurdert med bakgrunn i stikkprøver av grunnvann fra miljøbrønner på området. Det er derfor for begge løsninger lagt til grunn behov for gjennomføring av pilot før endelig utforming og dimensjonering av tiltaksløsning. Kostnad knyttet til pilot er betydelig høyere for barriereløsning sammenliknet med vannrensing, men vil for en barriereløsning kunne inngå som del av endelig løsning.

En betydelig usikkerhet knyttet til reaktiv barriere, i motsetning til vannrensing, er at den ikke fjerner forurensingen fra lokaliteten, men oppkonsentrerer forurensningen i barrieren over tid. Selv om Miljødirektoratet gjennom dialog tilknyttet tilsvarende løsning på BØF2 muntlig stilte seg positiv til denne typen tiltak så er det ikke kjent om de vil stille krav til senere oppgraving og deponering, noe som i så tilfelle vil kunne medføre en betydelig tilleggskostnad fram i tid. Det forventes imidlertid ingen slike krav så lenge overvåkning på nedstrøms side av barrieren tilfredsstiller akseptkriteriet gitt i endelig pålegg.

4.2 Anbefalt alternativ for videre prosjektering

Basert på en samlet vurdering av kostnader, risiko og muligheter anbefaler Norconsult at det etableres en pilot for reaktiv barriere som spredningsreduserende tiltak ved gammel brannstasjon (GBS) på Tromsø lufthavn, med mål om at denne videreføres til fullskala barriere dersom resultater fra piloten viser at dette kan være en egnet løsning og gi tilstrekkelig effekt i form av spredningsreduksjon.

Anbefalingen er basert på at reaktiv barriere er forventet å ha en god spredningsreduserende effekt (> 90%), samtidig som reaktiv barriere er en passiv løsning som ikke forventes å kreve driftsinnsats utover overvåkning som kan inngå som del av miljøovervåkningsprogrammet (MOV) ved lufthavnen. Løsningen har også en forventet kostnad (P50) som er lavere enn for vannrensing, både etter 10 og 20 års varighet, der kostnad relativ til effekt er særlig gunstig over tid da det ikke forventes kostnader knyttet til driftsinnsats etter etablering av barrieren.

Det bemerkes at Norconsult anerkjenner usikkerheter knyttet til foreslått metode, særlig knyttet til begrenset dokumentasjon av langtidseffekt sammenliknet med vannrensing som er en vel utprøvd og anerkjent metode. Norconsult er imidlertid av den oppfatning at GBS er en egnet lokalitet for å teste ut metoden som spredningsreduserende tiltak. Dette blant annet fordi risikoen anses begrenset da hovedandelen av forurensningen ligger i umettet sone under asfaltert areal, og fordi man gjennom overvåkning i allerede etablerte miljøbrønner har svært gode muligheter til kontinuerlig overvåkning over tid gjennom lufthavnens miljøovervåkning (MOV). Dette vil gi verdifull erfaring for eventuelle spredningsreduserende tiltak ved andre lufthavner på lokaliteter hvor mengden i jord er relativt lav, og/eller forurensningen ligger utilgjengelig for oppgraving.

For å ha noe å falle tilbake på dersom reaktiv barriere gjennom pilot ikke viser seg egnet, kan en mulighet være å gjennomføre pilot både for barriere og rensing av grunnvann. Dette innebærer ikke en større merkostnad, ettersom kostnad for pilot for vannrensing er estimert til om lag 200 000 NOK. Man vil gjennom dette kunne fremskaffe et godt grunnlag for valg av endelig løsning og videre prosjektering.

Anskaffelse av samtidige piloter for de to alternative tiltaksløsningene, for en videre gjennomføring av kun en av disse i fullskala, antas å kunne være anskaffelsesmessig utfordrende. Norconsult har ikke gjort vurderinger av aktuelle anskaffelsesformer, da dette forutsettes håndtert av egne rådgivere hos Avinor.

5 Referanser

[1] Miljødirektoratet, «Pålegg om å utarbeide tiltaksplan for opprydning i PFAS-forurenset grunn ved Tromsø Lufthavn. Ref. nr. 2021/1846,» 2021.

[2] Miljødirektoratet, «Omgjøring av vedtak - utsatt frist for tiltaksplan for Tromsø lufthavn, ref. nr. 2021/1846,» 2023.

[3] Miljødirektoratet, «Pålegg om å utarbeide tiltaksplaner for opprydding i PFAS-forurenset grunn ved Stavanger, Alta, Haugesund, Kristiansund og Kirkenes lufthavn,» Pålegg datert 16.09.2022, 2022.

[4] Norconsult, «Tiltaksplan for PFAS-forurenset grunn, Tromsø lufthavn Langnes, del 1: Oppsummering av resultater og risikovurdering, Rapportnummer: 5205614-RIM09-ENTC,» 2024.

[5] Norconsult, «Tiltaksplan for PFAS-forurenset grunn, Tromsø lufthavn Langnes, del 2: Kostnadsberegninger og foreslåtte tiltak. Rapportnummer: 5205614-RIM09-ENTC,» 2024.

[6] Sweco og Norconsult, «Tromsø lufthavn Langnes - Undersøkelser av jord, vann og biota med risikovurdering, rap. nr. 168186-18-J8,» 2016.

[7] Norconsult, «Supplerende undersøkelser av PFAS-forurensning i jord og vann, Tromsø lufthavn, sist nedlagte brannøvingsfelt (BØF1). Rapport nummer: 5205614-RIM03-ENTC-1,» 2024.

[8] Norconsult, «Supplerende undersøkelser av PFAS-forurensning i jord og vann, Tromsø lufthavn, gammelt brannøvingsfelt (BØF2). Rapportnummer: 5205614-RIM05-ENTC,» 2024.

[9] Norconsult, «Supplerende undersøkelser av PFAS-foruresning i jord og vann, Tromsø lufthavn, utfylt område ved Ørneveien (UOØ). Rapportnummer: 5205614-RIM07-ENTC,» 2024.

[10] Norconsult, «Supplerende undersøkelser av PFAS-forurensning i jord og vann, Tromsø lufthavn. gammel brannstasjon og deice-plattform. Rapportnummer: 5205614-RIM04-ENTC-GBS,» 2024.

[11] Norconsult, Supplerende undersøkelser av PFAS-forurensning i vann (OV-system) og biota, rapport nr. 5205614-RIM-06-ENTC, 2024.

[12] Miljødirektoratet, «Varsel om pålegg om å gjøre tiltak i PFAS-forurenset grunn ved Tromsø lufthavn, Langnes. Referansenummer 2021/1846,» 2024.

[13] Norconsult AS, «Oppdatert vurdering av tiltaksmetoder og kostnader. Gammelt brannøvingsfelt (BØF2). Tromsø lufthavn.,» 2025.

6 Vedlegg

Vedlegg 1 Matrise risiko og muligheter ved alternative tiltaksløsninger

Vedlegg 2 Rapport labtest ECT2

Vedlegg 1 Matrise risiko og muligheter ved alternative tiltaksløsninger

Beskrivelse av tiltak	**Rensing av grunnvann ("pump and treat")**	**Reaktiv barriere**
	Innebærer oppsamling av grunnvann med påfølgende rensing i renseanlegg før utslipp til resipient (antatt via overvannssystem til dypt vann via eksiterende utslippsledning). Oppsamlingssystem er i tiltaksplanen skissert i form av pumpebrønner fordelt på rekke normalt på grunnvannets strømningsretning. I lys av senere undersøkelser er det aktuelt å se på alternativ oppsamlingsløsning, eksempelvis drenering på selvfall til pumpekum. Renseanlegg plasseres i permanent bygg, og tiltaket innebærer etablering av infrastruktur i grunnen. Vurderinger av aktuelle renseløsninger og kostnader for disse er basert på dialog og priser mottatt fra ECT2, som er en aktuell leverandør av vannrenseløsning for lokaliteten. Rensing av PFAS-holdig vann er imidlertid en kjent og veletablert tiltaksløsning, som flere leverandører har erfaring med.	Innebærer injeksjon av sorbent (kolloidalt aktivt kull i suspensjon) i mettet sone (under grunnvannsnivå) og kapillærsonen for å etablere en reaktiv barriere normalt på grunnvannets strømningsreting. Denne barrieren vil da bestå av en sorbent som vil binde PFAS i grunnvannet som strømmer gjennom barrieren, og derigjennom holde tilbake forurensing fra å nå respient. Etablering av barrieren innebærer bruk av borerigg for injeksjon av sorbent. Utover etablering av miljøbrønner for overvåkning av barrieren forventes ikke behov for etablering av infrastruktur i grunnen. Vurderinger av reaktiv barriere som tiltaksmetode og kostnader for denne er basert på dialog og priser mottatt fra Regenesis, som er en aktuell leverandør av denne tiltaksløsningen for lokaliteten. Det er for denne tiltaksløsningen få aktuelle leverandører i markedet. Dette er også en relativt ny og mindre utprøvd tiltaksløsning, med mangelfull dokumentasjon særlig med tanke på langtidseffekt og faktisk "levetid" for løsningen.
Kostnader	**Skissenivå**	**Skissenivå**
P50 (10 år)	38 300 000	33 900 000
P50 (20 år)	47 900 000	33 900 000
Pilotforsøk	200 000 (ekskl. analysekostnader, 3 mnd. varighet)	1 200 000 (inkl. i P50 over , 6 mnd. varighet)
P85	Kommer etter usikkerhetsanalyse	Kommer etter usikkerhetsanalyse
Effekt		
Forventet effekt (kg PFAS)	4,4 kg etter 10 år 5,0 kg etter 20 år	4,4 kg etter 10 år 5,0 kg etter 20 år
Risiko		
Risiko 1: Gjenværende forurensning i mettet sone	Lav risiko: Forurensning i grunnvann (mettet sone) vil fjernes fra lokaliteten.	Høy risiko: Fjerner ikke forurensingen fra lokaliteten. Usikkert hva som skjer over tid, og i hvilken grad forbindelsene over tid vil lekke ut igjen. Usikkert om Mdir godkjenner løsningen og/eller om det vil komme krav om å fjerne barrieren med påfølgende ekstern deponering om X år.
Risko 2: Gjenværende forurensning i umettet sone	Høy risiko: Tiltaket retter seg mot mettet sone.	Høy risiko: Tiltaket retter seg mot mettet sone.
Risiko 3: Pålegg med strengere krav til tiltaksomfang og/eller rensegrad enn hva som ligger til grunn for kostnadsberegninger	Middels risiko: Strengere krav til oppsamlingsløsningens utstrekning og oppnådd rensegrad for vann vil medføre økte kostnader.	Middels risiko: Strengere krav til barrierens utstrekning vil medføre økte kostnader.

Risiko 4: Usikkerhet knyttet til innkommende vannkvalitet kan gi økte kostnader sammenliknet med det som ligger til grunn i kostnadsberegningene	Middels risiko: Vurdering av vannkvalitet er basert på stikkprøver. Vannkvalitet i utpumpet vann over tid kan vise seg å være mer kompleks enn hva resultater fra stikkprøver viser. Dette vil kunne gi økte driftskostnader.	Middels risiko: Vurdering av vannkvalitet er basert på stikkprøver. Vannkvalitet i tilstrømmende vann til barrieren kan vise seg å være mer kompleks enn hva resultater fra stikkprøver viser, som igjen vil kunne påvirke levetid og behov for reinjeksjon.
Risiko 5: Behov for pilot. Resultater fra pilot gir grunnlag for annen utforming/dimensjonering av tiltaksløsning sammenliknet med hva som ligger til grunn for kostnadsberegingene	Høy risiko: Pilot anbefales. Endelig prosessløsning usikker, grunnet usikkerhet knyttet til innkommende vannkvalitet ved pumping over tid og nødvendig omfang av forbehandlig og innsatsmidler. Gasser forbundet med særskilt risiko (CH4 og H2S) må håndteres gjennom forbehandling.	Høy risiko: Pilot påkrevd. Endelig design (omfang innsatsmiddel/sorbent) usikker.
Risiko 6: Søknadsprosesser med lang behandlingstid kan påvirke fremdrift	Middels risiko: Erfaringsmessig lange søknadsprosesser mot Tromsø kommune. Forventes å gjelde for etablering av bygg/RA.	Lav risiko: Forventer ingen søknadsprosess. Tillatelse til etablering forventes dekket gjennom pålegg fra Miljødirektoratet.
Risiko 7: Få aktuelle leverandører gir risiko for liten grad av reell konkurranse	Lav risiko: Antatt flere aktuelle leverandører gir forventet reell konkurranse.	Høy risiko: Antatt få leverandører av løsningen kan gi liten reell konkurranse. Leverandører vil likevel være kjent med at de vil konkurrere mot alternativt tiltak.
Muligheter		
Mulighet 1: Spredningsmengde og konsentrasjoner i innkommende vann avtar raskere enn forventet, og gir kortere varighet av tiltak enn det som er forventet	Middels sannsynlig: Kortere varighet av tiltaket vil påvirke driftskostnader, men ikke investeringskostnader	Ikke relevant: Reaktiv barriere er en passiv løsning der varighet ikke påvirkes av om spredning og konsentrasjoner avtar raskere enn forventet. Tiltaket vil imidlertid kunne fungere som spredningsreduserende barriere på eventuell utlekking fra umettet sone under asfaltert område ved fremtidige arealbruksendring, terrenginngrep e.l.
Mulighet 2: Tiltaket fjerner forurensing fra lokaliteten	Svært sannsynlig: Tiltaket fjerner PFAS fra oppsamlet vann, og forurensede restfraksjoner fra renseanlegg (filtermedium mm.) sendes til godkjent mottaksløsning	Ikke relevant: Forurensningen "oppkonsentreres" i barrieren og reduserer/hindrer spredning til resipient innenfor antatt levetid (minimum 20 år, antatt betydelig lenger iht. aktuell leverandør). Usikker og lite dokumentert langtidseffekt.
Mulighet 3: Lavere forbruk av innsatsmidler enn lagt til grunn i kostnadsberegningene	Middels sannsynlig: Det forventes noe mer fordelaktig vannkvalitet over tid i en driftsfase sammenliknet med stikkprøver som utgjør dagens grunnlag for kostnadsbereging av prosessløsning. Det må også forventes mindre utfordringer knyttet til avisningskjemikalier når deice sør tas ut av bruk.	Lite sannsynlig: Design og utforming av reaktiv barriere vil ta utgangspunkt i dagens vannkvalitet, uten mulighet til å "nedjustere" innsatsmidler over over tid. Det kan likevel ikke utelukkes at designverifikasjonstest og pilot (påkrevd) gir grunnlag for reduksjon i innsatsmidler sammenliknet med det som ligger til grunn for kostnadsberegningene.
Mulighet 4: Endret oppsamlingsløsning for grunnvann kan gi lavere investeringskostnader	Middels sannsynlig: Mulig reduksjon i kostnad med oppsamling i drens til pumpekum fremfor etablering av brønner som ligger til grunn for kostnadsestimat. Mulig endret oppsamlingsløsning har bakgrunn i målt effekt som ses i dag i forbindelse med nedstrøms OV-trase normalt på strømningsretningen.	Ikke relevant: Det er ingen tilsvarende oppsamlingsløsning for tiltak med reaktiv barriere.

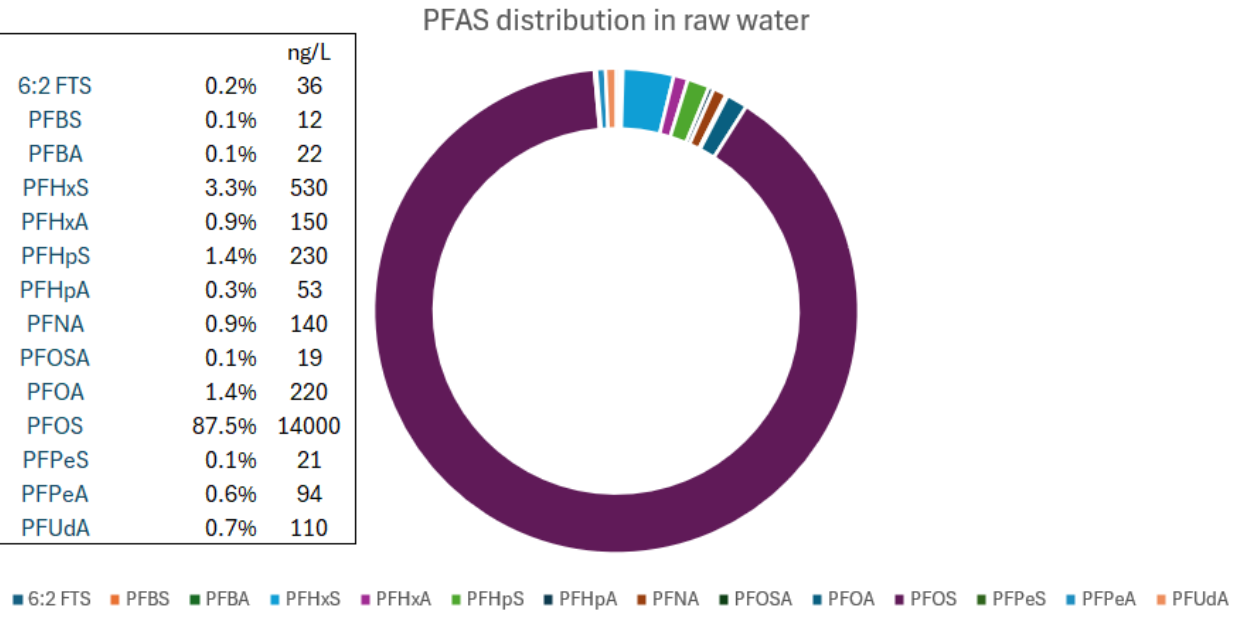
Mulighet 5: Verdifull erfaring med en metode som er lite utprøvd, men som kan være aktuell ved andre lokaliteter hvor total mengde i jord er relativt liten sammenliknet med andre lokaliteter, men der man ønsker reduksjon i spredning, eller lokaliteter hvor man ønsker tiltak uten store ingrep.	Lite relevant: Vannrensing er en velkjent og utprøvd metode.	Svært relevant: Egnet lokalitet for uttesting av denne metoden, da hovdeandel av forurensning i jord ligger i umettet sone under asfalt med særlig høy tetthetsgrad (de-ice standard) som reduserer risiko for utlekking til mettet sone.
Mulighet 6: Utforming av tiltaket gir lite behov for oppfølging i tiltakets levetid utover overvåkning inkludert som del av MOV	Lite sannsynlig: Renseanlegg vil måtte driftes gjennom hele perioden. Det samme gjelder eventuelle brønner/brønnpumper.	Svært sannsynlig: Det forventes ingen oppfølgingsbehov av reaktiv barriere, med mindre overvåkning tilsier behov for reinjeksjon.
Påvirkning andre prosjekter		
Masterplan	Baneforlengelse + ny taksebane sør. Østlig del av oppsamlingsløsning (brønner eller dreneringsgøft) vil berøres av en ev. fremtidig taksebane. Påvirkning avhenger av krav til masseutskifting/utfylling. Dersom oppsamlingsløsning baserer seg på brønner så vil disse berøres fysisk, og må fjernes.	Baneforlengelse + ny taksebane sør. Østlig del av barriere vil berøres av en ev. fremtidig taksebane. Påvirkning avhenger av krav til masseutskifting/utfylling.

Tromsø lufthavn testing av benkvekt

Benkvekttesting ble utført med 10 L representativt vann som ble fraktet til Slagelse, DK fra Tromsø, NO. Testingen var fokusert på koagulasjons-flokkulering, ved bruk av Fluorflok som et PFAS-spesifikt bindemiddel. Testene ble utført i tre eksemplarer for de valgte dosene.

Det testede vannet er et våtmarksgrunnvann fra nær Tromsø lufthavn. PFAS-fordelingen i vannet er presentert i figuren nedenfor, som viser at 88 % av forurensningen skyldes PFOS, med en høy konsentrasjon på 14000 ng/L. De resterende PFAS-molekylene er andre PFAS-molekyler med lengre kjede med en total konsentrasjon på ca. 2000 ng/L.

		ng/L
6:2 FTS	0.2%	36
PFBS	0.1%	12
PFBA	0.1%	22
PFHxS	3.3%	530
PFHxA	0.9%	150
PFHpS	1.4%	230
PFHpA	0.3%	53
PFNA	0.9%	140
PFOSA	0.1%	19
PFOA	1.4%	220
PFOS	87.5%	14000
PFPeS	0.1%	21
PFPeA	0.6%	94
PFUdA	0.7%	110



Flere koagulanter ble testet:

- Polyaluminiumklorid (PAX) – Alfloc-4
- Jernklorid (PIX) – PIX-11
- Jernklorid (MF) – Microfloc
- Aluminiumklorhydrat (ACH) - AluACH

Blant disse ble PAX funnet å fungere best basert på kvalitativ vurdering av flokkdannelse og styrke. Dette er i samsvar med tidligere erfaringer for Fluorflok-metoden.

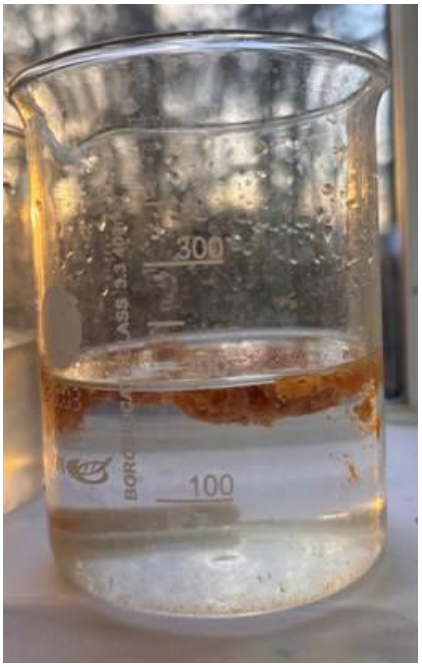
En kationisk polymer ble brukt som flokkuleringsmiddel.

Doseringene for triplikatene var følgende:

TABELL 1

	C1 FF Lav	C1 FF Middels	C1 FF Høy	C2 FF Middels
	ml/m3	ml/m3	ml/m3	ml/m3
1. PAX	150	150	150	300
2. Fluorflok	100	250	400	250
3. PIX	50	50	50	
4. Polymer	20	20	20	20

Hovedforskjellen mellom C1 og C2 er at for C1-doseringer ble PIX brukt som et sekundært koaguleringsmiddel etter dosering av Fluorflok. For C2 ble doseringen av PAX økt i stedet for å bruke PIX som sekundærkoagulant. Begge strategiene ga gode resultater når det gjelder en klar supernatant, men bedre flokkstyrke ble observert for C1-doseringer.



Resultatene fra benkskalatestingen for de 4 forskjellige dosene er oppsummert i tabell 2 nedenfor. Resultatene presenteres kun for analyserte PFAS-komponenter som var over deteksjonsgrensene.

Resultatene viser at uavhengig av Fluorflok-doseringen, fjernes mesteparten av PFAS fra vannet. Den beste doseringen er C1 FF Medium, hvor den totale PFAS-konsentrasjonen reduseres med 98 %, fra 16000 ng/L til 246,7 ng/L, mens PFAS 4-innholdet reduseres fra 15000 ng/L til 163 ng/L. Dette er også doseringen, hvor den laveste variasjonen er vist mellom de tredobbelte prøvene for de totale PFAS-konsentrasjonene.

Variasjonskoeffisienten er 11 % og 23 % for summen av PFAS og PFAS 4, noe som er godt innenfor usikkerheten på 31 % pålagt av Eurofins på enkeltstående PFAS-analyseresultater. Derfor er det trygt å si at resultatene er reproduserbare.

Ved å øke dosen som i C1 FF High, oppnås tilsvarende total PFAS-fjerning, men i så fall fjernes litt mer av den kortkjedede PFAS-en mens den lengre kjeden PFAS viser litt mindre fjerning. Videre, ved høyere FF-dosering, oppleves også høyere variasjon.

Ved den laveste dosen er PFAS-fjerningen mindre effektiv på både den lengre kjeden og den kortere kjeden PFAS – men fjerningen er fortsatt på 97 % og 98 % for summen av PFAS og PFAS 4, noe som fremhever effektiviteten til Fluorflok selv ved lavere doser.

Doseringen der PIX ikke ble brukt som sekundær koagulasjon, viser høye variasjoner og høyere gjenværende PFAS-nivåer ved henholdsvis 1013 ng/L og 910 ng/L for summen av PFAS og PFAS 4. Fjerningen er fortsatt på 94 % for begge sammenlignet med råvannet.

TOC reduseres i alle resultater; denne reduksjonen avtar imidlertid med økt dosering av Fluorflok. C1 FF Medium viser en TOC-reduksjon på 56 %, fra 58 mg/L til 25,7 mg/L. C2 FF Medium viser et TOC-nivå på 26 mg/L, noe som indikerer at mens den sekundære koagulasjonen bidrar til å fjerne mer PFAS, er TOC-nivåene uendret. Fluorflok er et biologisk nedbrytbart tilsetningsstoff, derfor blir ingen andre nye forurensninger introdusert til det behandlede vannet.

TABELL 2 RESULTATER FOR BENKSKALATESTING DER DE TREDOBBELTE RESULTATENE ER PRESENTERT VED MIDDELVERDI, GJENNOMSNITTLIG FJERNING %, STANDARDAVVIK OG VARIASJONSKOEFFISIENT.

	Rått vann	C1 - FF lav				C1 - FF Middels				C1 - FF Høy				C2 - FF Middels			
	Verdi	Bety	Fjerning	Stdev	CV	Bety	Fjerning	Stdev	CV	Bety	Fjerning	Stdev	CV	Bety	Fjerning	Stdev	CV
	ng/L	ng/L	%	ng/L	%	ng/L	%	ng/L	%	ng/L	%	ng/L	%	ng/L	%	ng/L	%
6:2 FOT	36	**6.6**	82%	1.8	27%	**5.5**	85%	1.2	22%	**13.3**	63%	0.9	7%	**33.4**	7%	22.4	67%
PFBS	12	**0.8**	94%	0.2	24%	**24.2**	-102%	33.8	140%	**0.3**	98%	0.0	0%	**3.9**	67%	4.3	110%
PFBA	22	**24.3**	-11%	0.5	2%	**13.3**	39%	0.5	4%	**8.6**	61%	0.0	0%	**17.0**	23%	2.2	13%
PFHxS	530	**7.2**	99%	1.8	25%	**5.8**	99%	1.1	19%	**7.7**	99%	2.4	31%	**39.7**	93%	12.5	32%
PFHxA	150	**37.0**	75%	1.4	4%	**10.1**	93%	2.1	21%	**5.4**	96%	0.4	7%	**16.0**	89%	0.0	0%
PFHpS	230	**3.5**	98%	1.0	28%	**2.8**	99%	0.8	30%	**3.1**	99%	1.0	31%	**13.3**	94%	1.2	9%
PFHpA	53	**2.9**	95%	0.1	4%	**1.8**	97%	1.2	68%	**0.8**	99%	0.2	19%	**5.2**	90%	3.4	65%
PFNA	140	**2.1**	98%	0.4	17%	**1.8**	99%	0.5	25%	**1.8**	99%	0.6	34%	**9.8**	93%	4.4	45%
PFOSA	19	**0.5**	98%	0.0	9%	**0.4**	98%	0.1	17%	**0.3**	98%	0.1	15%	**4.1**	79%	4.2	103%
PFOA	220	**6.3**	97%	0.7	10%	**5.5**	98%	2.3	42%	**3.6**	98%	0.9	24%	**14.7**	93%	3.9	26%
PFOS	14000	**246.7**	98%	62.4	25%	**153.3**	99%	36.8	24%	**200.0**	99%	78.7	39%	**843.3**	94%	253.8	30%
PFPeS	21	**0.5**	98%	0.1	11%	**0.4**	98%	0.1	21%	**0.3**	98%	0.0	13%	**4.1**	80%	4.1	100%
PFPeA	94	**66.3**	29%	2.6	4%	**19.3**	79%	0.5	2%	**10.6**	89%	0.5	5%	**27.7**	71%	1.7	6%
PFUdA	110	**2.0**	98%	0.4	21%	**1.2**	99%	0.3	21%	**1.7**	98%	0.7	40%	**7.4**	93%	1.8	25%
Sum PFAS	**16000**	**406.7**	**97%**	**70.4**	**17%**	**246.7**	**98.5%**	**26.2**	**11%**	**256.7**	**98%**	**88.1**	**34%**	**1013.3**	**94%**	**277.8**	**27%**
Sum PFAS 4	**15000**	**263.3**	**98%**	**66.0**	**25%**	**163.3**	**99%**	**36.8**	**23%**	**213.3**	**99%**	**83.4**	**39%**	**910.0**	**94%**	**277.2**	**30%**
TOC/NPOC (mg/L)	58	**14.0**	76%	0.0	0%	**25.7**	56%	1.2	5%	**41.7**	28%	1.2	3%	**26.0**	55%	0.8	3%

Driftskostnadsestimat for Fluorflok-behandling

En storskala Fluorflok-behandling trenger ingen forbehandling. Et slikt system består av et kjemisk blandingstrinn med flere kammer (flokkuleringstrinn) der flokkuleringen skjer og en flotasjonsenhet der separasjonen av flokkene og supernatanten finner sted (flotasjonstrinn). Potensielt på grunn av den lave bufferkapasiteten til vann, kan et pH-justeringstrinn være nødvendig, men det kan implementeres i flokkuleringstrinn.

Driftskostnadene til et slikt system er hovedsakelig avhengig av den brukte kjemien. En omtrentlig OPEX ved bruk av kjemisk dosering som i C1 FF Low vil være rundt 45 NOK/m3 behandlet vann.

Denne driftskostnaden inkluderer ikke slamdeponering, som er en viktig del av behandlingen, da denne fraksjonen inneholder de oppkonsentrerte forurensningene. Med den gitte doseringen kan det forventes en avvannet slamgenerering på ca. 1-1,5 kg/m3. Deponering av dette avvannede slammet vil medføre ytterligere kostnader, som avhenger av avtalene med relevante avfallshåndteringsselskaper.