



Lufthavn:		ENCN – Kristiansand lufthavn, Kjevik			
Prosjekttittel:		Opprydding av PFAS-forurenset grunn, nedlagt brannøvingsfelt BØF 2			
Tittel:		Oppdaterte tilleggsvurderinger			
FE04	25.02.26	Forprosjekt – For bruk	LaVae AnPen	AiNor	AiNor
FB03	14.01.26	Forprosjekt – For kommentar	LaVae AnPen	AiNor	AiNor
FB02	25.12.23	Forprosjekt – For kommentar	BojDro LaVae AnPen	LaVae AnPen	AnPen
FA01	22.12.25	Forprosjekt – Intern utgave	BojDro LaVae AnPen	LaVae AnPen	AnPen
Revisjon	Dato	Tekst	Laget	Kontrollert	Godkjent
Logo:			Etg.	System	Antall sider:
Norconsult 			000	000	Side 1 av 52
Prosjektnr.	Kontraktsnr.	Inv.nr/Område.	Fag:	Dokumenttype:	Løpenummer:
10005886	188103	CN000	S	RA	0002
			Revisjon:		
			FE04		

Avinor AS

Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdaterte tiltaksvurderinger

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04 Dato: 2026-02-25



Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04

Oppdragsgiver: Avinor AS
Oppdragsgivers kontaktperson: Ijaz Ahmed
Rådgiver: Norconsult Norge AS
Oppdragsleder: Aina Marie Nordskog
Fagansvarlig: Lars Været og Annelene Pengerud
Andre nøkkelpersoner: Bojana Terzic, Henrikke Børsum, Eirik Olsen, Florian Wagner, Heine Digranes

Revisjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent
A01	2025-12-22	Til fagkontroll	Bojana Terzic Lars Været Annelene Pengerud	Lars Været Annelene Pengerud	Annelene Pengerud
B02	2025-12-23	For kommentar	Bojana Terzic Lars Været Annelene Pengerud	Lars Været Annelene Pengerud	Annelene Pengerud
B03	2026-01-14	For kommentar – inkl. flere tiltaksalternativer	Lars Været Annelene Pengerud	Aina Nordskog	Aina Nordskog
J04	2026-02-25	For bruk	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

Bakgrunn

Norconsult utarbeidet i 2023 en revidert tiltaksplan for de nedlagte brannøvingsfeltene (BØF1 og BØF2) ved Kristiansand lufthavn. Det ble i tiltaksplanen foreslått tiltak med tildekking av masser, kombinert med rensing av grunnvann, for gammelt brannøvingsfelt (BØF1). For sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2) ble det foreslått et tiltak med rensing av grunnvann som eneste tiltak.

I oktober 2025 ble Avinor pålagt av Miljødirektoratet å gjøre tiltak i PFAS-forurensset grunn ved Kristiansand lufthavn. Det ble i pålegget stilt krav om at tiltakene skal gjennomføres som beskrevet i tiltaksplanen og tilleggsvurderinger til denne, og i tråd med vilkår gitt i pålegget. Frist for gjennomføring av tiltakene er i pålegget satt til 31. desember 2026.

Det har gjennom sommeren og høsten 2025 vært gjennomført supplerende undersøkelser ved begge brannøvingsfeltene som grunnlag for prosjektering av tiltak. Forprosjekt og detaljprosjekt med tegninger og beskrivelse er utarbeidet for tiltak med tildekking av masser på gammelt brannøvingsfelt (BØF1).

For sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2) ble det høsten 2025 påbegynt prosjektering av et tiltak med rensing av grunnvann. Innledningsvis i dette arbeidet ble det funnet indikasjoner på at et tiltak med rensing av grunnvann mulig var mindre egnet for lokaliteten enn det som var lagt til grunn i tidligere vurderinger i tiltaksplanen. Det er også stor usikkerhet knyttet til driftskostnader og effekt over tid for et slikt langvarig tiltak. Resultater fra supplerende undersøkelser og oppdaterte mengdeberegninger, tilsa også at et tiltak med oppgraving og eksternt deponering av masser mulig kunne være et mer kostnadseffektivt tiltak for lokaliteten enn det som ble lagt til grunn i tiltaksplanen.

På bakgrunn av ovenstående, er det etter nærmere dialog med Avinor besluttet å utarbeide en oppdatert tiltaksvurdering for lokaliteten. Dette for å sikre at beslutninger knyttet til valg av tiltaksmetode og tiltaksomfang fattes basert på mest mulig oppdatert grunnlag.

Oppdaterte mengde- og spredningsberegninger

Ved sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2) er det gjennom oppdaterte mengdeberegninger beregnet totalt 9,0 kg PFAS i jord innenfor et totalt volum masser på 67 600 m³. Den største andelen av forurensingen ligger i umettet sone eller i overgangen til mettet sone (7,7 kg av totalt 9,0 kg). Dette tilsier at en større andel av forurensningen ligger i umettet sone, sammenliknet med det som ble lagt til grunn i tiltaksplanen (6,2 kg i umettet sone av totalt 10,1 kg), og at et tiltak som retter seg mot umettet sone vil kunne ha en relativt stor tiltakseffekt. Uavhengig av dette, så vil det for denne lokaliteten fortsatt være aktuelt med tiltak/tiltakskombinasjoner rettet mot både umettet og mettet sone for størst mulig samlet tiltakseffekt. Dette gjelder særlig dersom man ser begge brannøvingsfeltene under ett, hvor et spredningsreducerende tiltak som retter seg mot mettet sone vil kunne omfatte begge feltene uten nødvendigvis å innebære en betydelig merkostnad.

Oppdaterte spredningsberegninger viser en samlet spredning fra begge brannøvingsfeltene på om lag 310 g PFAS/år, hvorav 170 g/år fra BØF1 og 140 g/år fra BØF2. Dette er en lavere spredningsmengde enn det som ble beregnet i tiltaksplanen, noe som tilsier mulig lavere årlig effekt og behov for lengre varighet av et tiltak med rensing av grunnvann dersom dette utføres som eneste tiltak for BØF2.

Vurderte tiltaksalternativer

Det er i oppdaterte tiltaksvurderinger vurdert kostnader og tiltakseffekt for følgende tiltaksalternativer:

Alternativ A: Rensing av grunnvann

Alternativ A1: Rensing av grunnvann BØF 1 og BØF2

Alternativ A2: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Alternativ A3: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (*lite omfang*)

Alternativ A4: Rensing av grunnvann BØF og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (*middels omfang*)

Alternativ B: Reaktiv barriere

Alternativ B1: Reaktiv barriere BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Alternativ B2: Reaktiv barriere BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Alternativ C: Oppgraving med ekstern deponering

Alternativ D: Tildekking BØF2

Tiltaksanbefaling

Basert på en totalvurdering anbefaler Norconsult tiltaksalternativ A2: *Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hotspot» BØF2* for gjennomføring av opprydningstiltak ved lokaliteten.

Dette er et tiltak som har en relativt høy basiskostnad, men også en høy effekt i form av mengde PFAS fjernet. Det anbefales utgraving av «hotspot» i kombinasjon med rensing av grunnvann, da man gjennom et slikt kombinasjonstiltak vil kunne oppnå en sikrere effekt av tiltaket, samtidig som man mest sannsynlig reduserer nødvendig varighet av vannrensetiltaket, sammenliknet med et vannrensetiltak alene (tiltaksalternativ A1). Dette alternativet vil også omfatte forurensning i mettet sone på BØF1.

Dette er et tiltak som man har tillatelse til gjennom gjeldende pålegg fra Miljødirektoratet.

Tiltaksalternativ C2: *Oppgraving og ekstern deponering av masser BØF2 >100 µg/kg* bør vurderes videre som et mulig alternativ til A2.

Tiltaksalternativ C2 har en noe lavere basiskostnad, og også noe lavere forventet effekt, sammenliknet med alternativ A2. Tiltaksalternativet vil også innebære en relativt høy gjennliggende mengde PFAS på lokaliteten etter tiltak (60% fjernet gjennom tiltak, 40% gjennliggende av total mengde). Fordeler med et slikt tiltak er imidlertid at man fjerner mye av forurensningen «her og nå», og at man slipper den forpliktelse og de usikkerheter som ligger i oppfølging og effekt av et vannrensetiltak over lang tid.

Tillatelse til gjennomføring av oppgraving og ekstern deponering som eneste tiltak er ikke omfattet av gjeldende pålegg fra Miljødirektoratet. Det vil da være en risiko for at Miljødirektoratet ikke godkjenner tiltak som ikke inkluderer mettet sone BØF1, eller et tiltaksomfang med en forventet effekt som ikke anses tilstrekkelig.

Tiltaksalternativene B: *Reaktiv barriere* og D: *Tildekking* vurderes som lite aktuelle.

For reaktiv barriere skyldes dette i stor grad kostnaden, men også den betydelige usikkerheten knyttet til effekt og «levetid» for en slik metode. Tildekking har en lav kostnad sammenliknet med andre vurderte alternativer, men har samtidig en forventet lav effekt. Dette skyldes i hovedsak en begrenset mektighet på umettet sone (over grunnvann), hvor tildekkingen ikke vil ha effekt på den andel av forurensningen som ligger i mettet sone (under grunnvann), samt begrenset mulighet for tildekking av bratt skråning mot nordvest. Fremtidige klimaendringer og havnivåøkning vil også gi en forventet en redusert mektighet for umettet sone, og følgelig avtakende effekt for et tiltak med tildekking over tid. Dette vil også gjelde tiltaksalternativene A3 og A4 som inkluderer tildekking som del av tiltaksløsningen.

Videre arbeid

Det er betydelige usikkerheter i beregnede volumer og mengde PFAS i jord for lokaliteten, noe som medfører usikkerheter knyttet til volum masser for utgraving og effekt av tiltak med oppgraving og ekstern deponering av masser (tiltaksalternativ C2). Denne usikkerheten er særlig knyttet til masser i skråningen nordvest for BØF2. Det er i tillegg noe mangelfull avgrensing av forurensning mellom brannøvingsfeltet og Topdalselva (utenfor lufthavngjerdet). Samtlige punkter utenfor lufthavngjerdet har lave konsentrasjoner av Σ PFAS (<30 µg/kg), men antall punkter er begrenset og er i relativt lang avstand til nærmeste punkt med høyere konsentrasjoner (<150 µg/kg). For å redusere usikkerhet knyttet til volum forurensede masser og mengder PFAS, og dermed usikkerhet knyttet til valg av tiltaksmetode og tiltaksomfang, samt tilhørende kostnad og effekt av tiltaket, anbefales det å utføre supplerende undersøkelser i skråningen.

Det vil bli utarbeidet egen prøvetakingsplan for supplerende undersøkelser, hvor omfang og gjennomføring avklares med Avinor før gjennomføring. Supplerende undersøkelser planlegges gjennomført våren 2026.

I etterkant av påfølgende miljøtekniske grunnundersøkelser må tiltaksavgrensning oppdateres, sammen med oppdaterte mengder PFAS og hvilket volum masser forurensningen er fordelt i. Dette vil danne grunnlag for oppdaterte beregninger av kostnader og tiltakseffekt for tiltaksalternativ A2 og C2, som vil inngå i beslutningsgrunnlag for endelig anbefaling og beslutning knyttet til tiltaksalternativ.

Som følge av behov for supplerende undersøkelser anses det ikke gjennomførbart å overholde frist for å gjennomføre tiltak i 2026 i tråd med Miljødirektoratets pålegg.

Innhold

1	Bakgrunn	8
1.1	Tidligere utarbeidet tiltaksplan	8
1.2	Pålegg fra Miljødirektoratet	9
1.3	Formål	10
2	Supplerende undersøkelser 2025	11
2.1	Utførte undersøkelser	11
2.2	Resultater	13
3	Mengdeberegninger	18
3.1	Metode og forutsetninger	18
3.2	Beregnete mengder	19
4	Hydrogeologisk modellering	23
4.1	Metode og forutsetninger	23
4.2	Modellerte scenarier	26
4.3	Modelleringsresultater	27
5	Spredningsberegninger	30
6	Tiltaksalternativer	32
6.1	Alternativ A: Rensing av grunnvann	33
6.2	Alternativ B: Reaktiv barriere	38
6.3	Alternativ C: Oppgraving med ekstern deponering	40
6.4	Alternativ D: Tildekking	41
7	Kostnader	43
7.1	Metode og forutsetninger	43
7.2	Beregnete kostnader	44
8	Tiltaksanbefaling	48
8.1	Tiltaksalternativer som ikke vurderes videre	48
8.2	Tiltaksalternativer som tas med i videre vurderinger	49
8.3	Videre arbeider	50
9	Referanser	51
10	Vedlegg	52

Vedlegg 1	Matrise tiltaksalternativer
-----------	-----------------------------

1 Bakgrunn

1.1 Tidligere utarbeidet tiltaksplan

I 2015 utarbeidet Norconsult en tiltaksplan på skissenivå for opprydding i PFAS-forurensnet grunn ved de nedlagte brannøvingsfeltene (BØF1 og BØF2) ved Kristiansand lufthavn Kjevik [1]. Tiltaksplanen ble utarbeidet basert på krav i pålegg fra Miljødirektoratet datert 17. juli 2014 [2].

Avinor har de senere år lagt ned betydelige ressurser for å fremskaffe økt kunnskap om PFAS-forurensning ved sine lufthavner, samt oppdatert kunnskap om aktuelle tiltaksmetoder og kostnader knyttet til disse. Med bakgrunn i erfaringene som er bygget opp gjennom dette arbeidet, samt pålegg gitt for andre lufthavner, ble det i 2023 utarbeidet en revidert tiltaksplan for de nedlagte brannøvingsfeltene (BØF1 og BØF2) ved Kristiansand lufthavn [3].

Det ble i den reviderte tiltaksplanen foreslått tiltak med tildekking av masser, kombinert med rensing av grunnvann, for gammelt brannøvingsfelt (BØF1). For sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2) ble det foreslått et tiltak med rensing av grunnvann som eneste tiltak. Denne tiltaksplanen ble utarbeidet på skissenivå og brukes som grunnlag for videre detaljering og gjennomføring av tiltak [3].

Lokalisering av de to brannøvingsfeltene er vist i Figur 1-1. For en nærmere beskrivelse av de aktuelle lokalitetene vises det til tiltaksplan [3].



Figur 1-1: Oversiktskart med lokalisering av de nedlagte brannøvingsfeltene, BØF1 og BØF2, ved Kristiansand lufthavn. Skravert område indikerer areal for planlagt tiltak med tildekking ved BØF1.

1.2 Pålegg fra Miljødirektoratet

Med bakgrunn i revidert tiltaksplan utarbeidet i 2023 påla Miljødirektoratet 6. oktober 2025 Avinor å gjøre tiltak i PFAS-forurensset grunn ved Kristiansand lufthavn Kjevik [4]. Det er i pålegget stilt krav om at tiltakene skal gjennomføres som beskrevet i tiltaksplanen [3] og tilleggsvurderinger til denne [5], og i tråd med vilkår gitt i pålegget. Frist for gjennomføring av tiltakene er i pålegget satt til 31. desember 2026.

Det er for tiltak med rensing av grunnvann på sist nedlagte brannøvingsfelt (BØF2) stilt krav om at tiltaket skal pågå inntil man gjennom tiltaket har fjernet en mengde PFAS på 80% av den mengde som i tiltaksplanen ble beregnet å ligge på lokaliteten i dag, dvs. om lag 8 kg av totalt 10,1 kg på lokaliteten [4].

1.3 Formål

Det har gjennom sommeren og høsten 2025 vært gjennomført supplerende undersøkelser ved begge brannøvingsfeltene som grunnlag for prosjektering av tiltak. Forprosjekt og detaljprosjekt med tegninger og beskrivelse er utarbeidet for tiltak med tildekking av masser på gammelt brannøvingsfelt (BØF1).

For sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2) ble det høsten 2025 påbegynt prosjektering av et tiltak med rensing av grunnvann. Innledningsvis i dette arbeidet ble det funnet indikasjoner på at et tiltak med rensing av grunnvann mulig var mindre egnet for lokaliteten enn det som var lagt til grunn i tidligere vurderinger i tiltaksplanen. Det er også stor usikkerhet knyttet til driftskostnader og effekt over tid for et slikt langvarig tiltak. Resultater fra supplerende undersøkelser og oppdaterte mengdeberegninger, tilsa også at et tiltak med oppgraving og ekstern deponering av masser mulig kunne være et mer kostnadseffektivt tiltak for lokaliteten enn det som ble lagt til grunn i tiltaksplanen.

På bakgrunn av ovenstående, er det etter nærmere dialog med Avinor besluttet å utarbeide en oppdatert tiltaksvurdering for lokaliteten. Dette for å sikre at beslutninger knyttet til valg av tiltaksmetode og tiltaksomfang fattes basert på mest mulig oppdatert grunnlag.

Formålet med denne rapporten er å gjøre en ny vurdering av kostnader og tiltakseffekt for ulike alternative tiltaksmetoder for det sist nedlagte brannøvingsfeltet (BØF2), som grunnlag for intern beslutning hos Avinor knyttet til valg av tiltaksmetode for lokaliteten. Dersom det gjennom disse vurderingene anbefales et annet tiltak enn det som er foreslått i tidligere utarbeidet tiltaksplan [3] og videre lagt til grunn i pålegg fra Miljødirektoratet [4], vil dette kreve utarbeidelse av revidert tiltaksplan for ny behandling og godkjenning hos Miljødirektoratet.

2 Supplerende undersøkelser 2025

2.1 Utførte undersøkelser

Som del av arbeidet med forprosjekt for tiltak ved de nedlagt brannøvingsfeltene (BØF1 og BØF2) er det gjennomført en rekke supplerende undersøkelser sommeren og høsten 2025. Undersøkelsene har primært vært rettet mot planlagt primærtiltak med rensing av grunnvann ved BØF2, men har også inkludert undersøkelser relevant for rensing av grunnvann som sekundærtiltak ved BØF1.

2.1.1 Befaring

Det ble i september 2025 gjennomført befaring sammen med Avinor ved oppstart av forprosjekt for tiltak i PFAS-forurensset grunn ved de nedlagte brannøvingsfeltene.

2.1.2 Supplerende undersøkelser jord

Supplerende prøvetaking jord

Det ble i august 2025 tatt ut prøver med naverbor, hovedsakelig for hver meter ned til 5-6 m dyp, i ni punkter på BØF2 (N1-N7 og BET1-BET2), hvorav to punkter under øvingsplattformen (BET1 og BET2).

Undersøkelsene ble utført for økt sikkerhet i vertikal og horisontal avgrensing av PFAS i jord, samt gi et bedre bilde av forurensningssituasjonen med tanke på andre forurensningsparametere utover PFAS. Det er til sammen analysert 52 prøver fra disse undersøkelsene. Analyseresultatene har inngått som grunnlag for oppdaterte mengdeberegninger for PFAS i jord.

Supplerende prøver andre fraksjoner

Det ble i september 2025 tatt ut kjerneprøver av betong i to punkter (BET1 og BET2) på øvingsplattformen på BØF2. Det ble analysert prøver i to dyp av betongen i begge punkter, til sammen fire prøver.

Det ble også tatt fire prøver av betong (BØF1-BET01 og BET02, BØF1-BET03_1 og _2), samt en prøve av asfalt (BØF1_ASF01) ved BØF 1. Dette er prøver av en betongrampe, en gammel forsvarsbunker, samt betong og asfalt i en haug på området.

2.1.3 Supplerende undersøkelser grunnvann

Etablering av supplerende miljøbrønner og pumpebrønn

Det ble i august 2025 etablert fire supplerende miljøbrønner (BR72 – BR75), hovedsakelig i grenseområdet mellom BØF1 og BØF2, samt nedstrøms BØF1, med tanke på overvåkning før og under tiltak. Brønnene er etablert til ca. 4 m under terreng, med filterrør i nedre 3 m.

Det ble i tillegg etablert pumpebrønn (PB01) nedstrøms BØF2 for å utføre testpumping av denne.

Testpumping ble gjennomført i september 2025, men grunnet problemer med pumpe lot det seg ikke gjøre å gjennomføre testen som planlagt med trinnvis økt pumperate. Resultatene fra denne testen er derfor i mindre grad vektlagt i vurderingene.

Brønnetablering er utført av Hallingdal Brønn og Graveservice AS, med bistand fra Norconsult.

Prøver til kornfordelingsanalyser

I forbindelse med supplerende prøvetaking av jord, samt ved etablering av supplerende miljøbrønner og pumpebrønn, ble det tatt ut prøver til kornfordelingsanalyser for hver meter i intervallet 1-5 m dyp. Det er til

sammen analysert 20 prøver fra fem punkter, der prøvene er tatt med naverbor i tre punkter (N1, N4 og N6), og som blåseprøver i to punkter (PB01 og BR73). Samtlige prøvepunkter, med unntak av BR73, er tatt på/ved BØF2.

Kornfordelingsanalysene danner grunnlag for oppdatert beregning av hydraulisk ledningsevne. Beregnet hydraulisk ledningsevne inngår som del av grunnlaget for numerisk modellering av grunnvannsstrømning omtalt i kap. 4.

Slug tester

Det ble utført slug tester i til sammen 12 brønner. Foruten tester i BR60 og BR71 er samtlige tester utført i brønner ved BØF2 (PB01, BR48, BR49, BR54 A-C, BR59 og BR70A-C). Ved to lokaliteter (BR54 og BR70) er det utført tester på tre brønner med filter i ulike dyp (ca. 0-1 m, 1-2 m og 2-3 m under grunnvannsnivå).

Slug testene danner grunnlag for oppdatert estimat for hydraulisk ledningsevne (Hvorslevs metode). Beregnet hydraulisk ledningsevne inngår som del av grunnlaget for numerisk modellering av grunnvannsstrømning omtalt i kap. 4.

Innmåling av brønner

Miljøbrønner og pumpebrønn ved de nedlagte brannøvingsfeltene er etablert i flere omganger over en periode på >10 år. I løpet av denne perioden gikk man i Norge over fra det gamle høydesystemet NN1954 til å ta i bruk NN2000. For å sikre nøyaktig innmåling, og bruk av samme referansesystem, er derfor samtlige miljøbrønner målt inn på nytt.

Innmålinger er utført av ANKO AS, avdeling Kristiansand.

Målt grunnvannstand

Grunnvannstand er målt manuelt i samtlige brønner på de nedlagte brannøvingsfeltene i to omganger, i juni og september 2025, hvor siste målerunde inkluderte supplerende brønner etablert i august 2025.

Det er også etablert automatiske loggere for overvåkning av grunnvannstand i 11 brønner fordelt på BØF1 og BØF2, samt for logging av vannivå i Topdalselva. Loggerne ble installert i juni 2025, og første gang lest av i september. Loggerne henger fortsatt i brønnene på tidspunkt for utarbeidelse av denne rapporten.

Data fra målt grunnvannstand har inngått som del av kalibreringsgrunnlaget for numerisk modellering av grunnvannstand, og derigjennom som grunnlag for prosjektering av grunnvannsrensetiltak omtalt i kap. 4. Data inngår også som grunnlag for å vurdere fordeling av forurensing i jord mellom mettet og umettet sone.

Supplerende prøvetaking grunnvann

Det er tatt ut supplerende prøver for analyse av grunnvann i utvalgte brønner i to omganger, juni og september 2025.

I juni ble det tatt prøver fra seks miljøbrønner, hvorav to ved BØF1 (BR60 og BR71) og fire ved BØF2 (BR49, BR50, BR52, BR59). Prøvetakingen ble gjentatt i september, hvor det også ble tatt prøver fra supplerende brønner etablert i august (PB01, BR72-BR75).

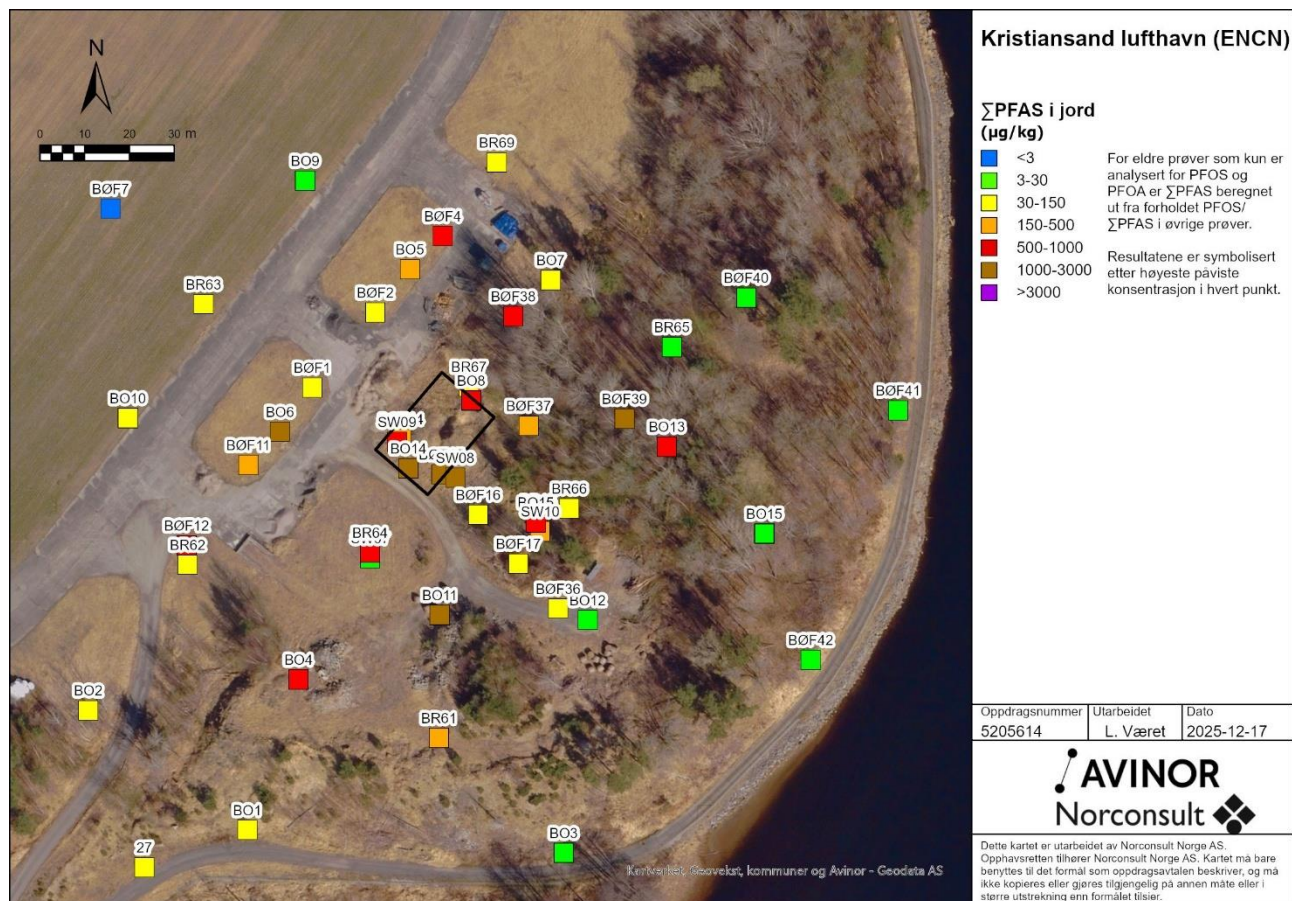
Prøvene vil inngå som del av dokumentasjon av dagens forurensingssituasjon, samt for vurdering av forventet vannkvalitet og egnet prosessløsning for et eventuelt fremtidig vannrensetiltak.

2.2 Resultater

2.2.1 Jord

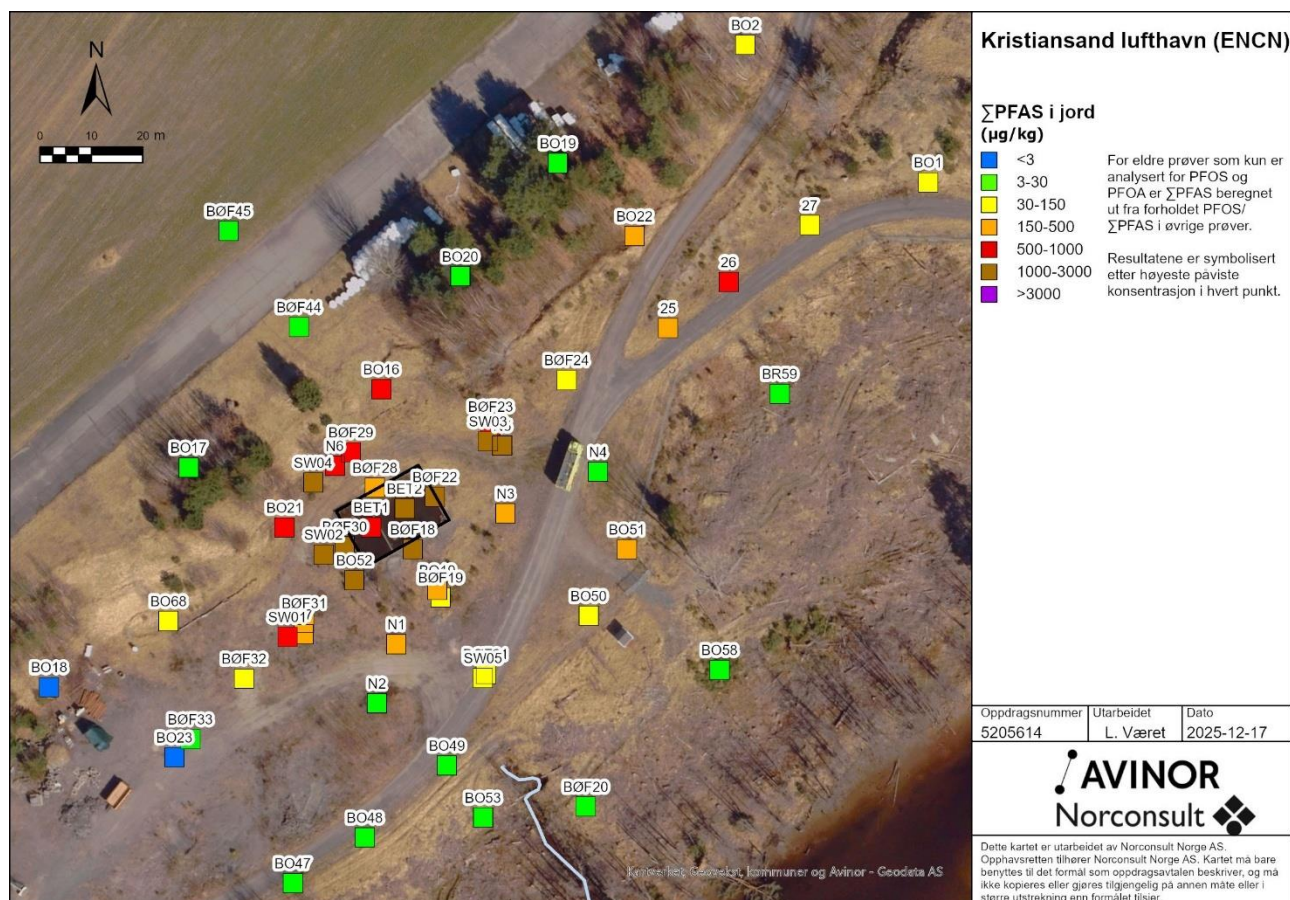
Det er ikke utført supplerende undersøkelser i jord ved BØF1. Resultater fra tidligere undersøkelser er vist i Figur 2-1.

Resultater fra tidligere og supplerende undersøkelser ved BØF2 er vist i Figur 2-2. Ved BØF2 er det påvist PFAS i samtlige supplerende prøver (2-1200 μg $\Sigma\text{PFAS}^1/\text{kg}$), med høyeste konsentrasjoner i øvre 0-2 m under og nær øvingsplattformen. Det er vertikal avgrensing til konsentrasjoner <30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ i samtlige prøvepunkter. Resultatene fra supplerende undersøkelser inngår som del av grunnlaget for oppdaterte mengdeberegninger for ulike konsentrasjonsgrenser (kap. 3).



Figur 2-1: Konsentrasjoner av ΣPFAS ($\mu\text{g}/\text{kg}$) i jord på BØF1. Ingen supplerende punkter i 2025.

¹ For nyere prøver benyttes ΣPFAS for å angi summen av 35 enkeltforbindelser. Enkelte tidligere prøver er analysert for et lavere antall enkeltforbindelser, hvor de eldste prøvene tatt i 2011-2012 kun ble analysert for PFOS og PFOA.



Figur 2-2: Konsentrasjoner av ΣPFAS (µg/kg) i jord på BØF2. Supplerende punkter i 2025 er N1-N7 og BET1-BET2.

2.2.2 Grunnvann

Prøver til kornfordelingsanalyser

Resultater fra kornfordelingsanalysene viser i all hovedsak ensgradert middels til grov sand, med innhold av finstoff (<0,06 mm) på omkring 5-7%.

Gjennomsnittlig hydraulisk ledningsevne (n=20) ligger i størrelsesorden 4-4,5E-4 m/s (Hazens metode) og 5,5-6E-4 m/s (Gustafsons metode), der kriteriet for bruk av Hazens metode er gyldig for 18 av 20 prøver. Beregnet hydraulisk ledningsevne inngår i grunnlag for numerisk modellering (kap. 4).

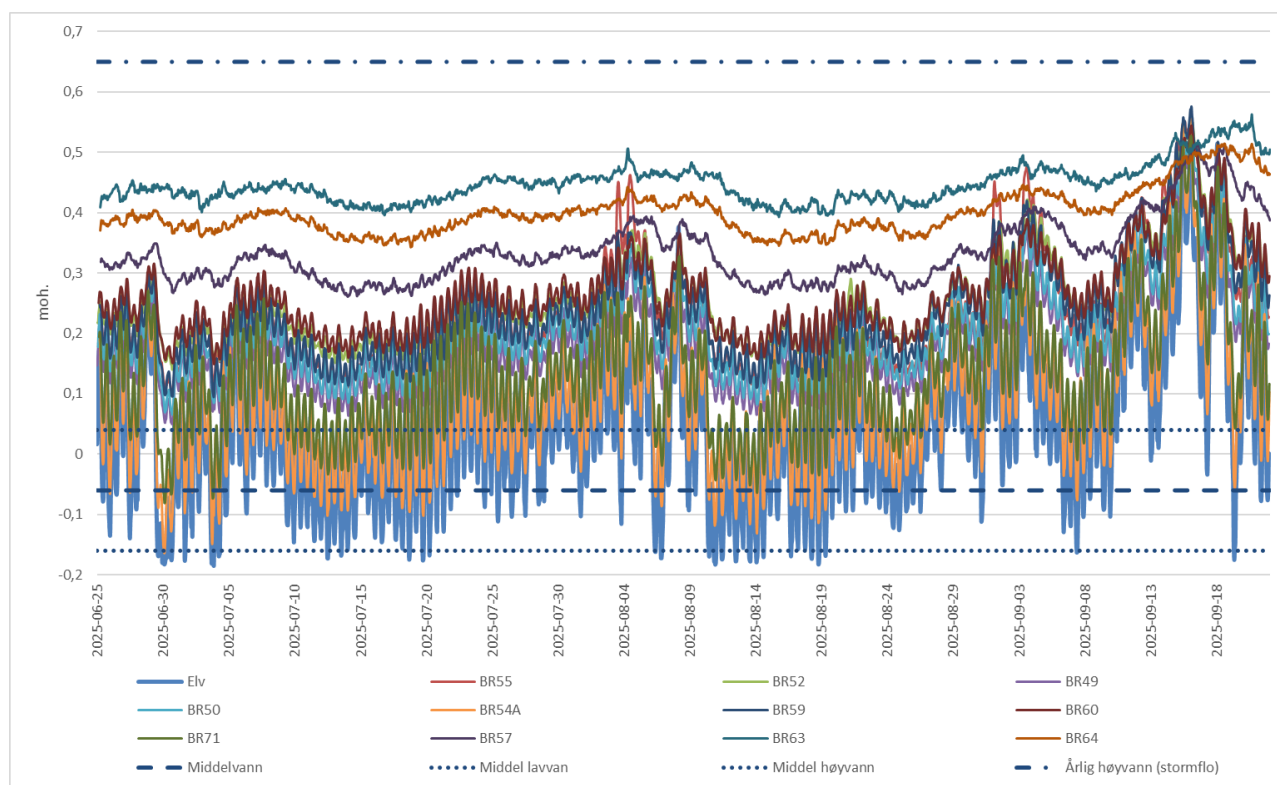
Slug tester

Gjennomsnittlig hydraulisk ledningsevne (n=12) beregnet med utgangspunkt i utførte slug tester er om lag 3E-4 m/s. Det bemerkes at det for de fleste brønnene ikke er ideelle forutsetninger for bruk av metoden da grunnvannsnivå sto under topp filter i flere brønner på tidspunkt for utførte tester. For de brønnene hvor også dette kriteriet er oppfylt (grunnvannsnivå over filter) er gjennomsnittlig hydraulisk ledningsevne (n=3) om lag 4E-4. Beregnet hydraulisk ledningsevne inngår i grunnlag for numerisk modellering (kap. 4).

Målt grunnvannstand

Målt variasjon med bruk av automatiske loggere i utvalgte brønner ved BØF1 og BØF2 for juni-september 2025 er vist i Figur 2-3, sammen med nivå for middelvann, middel lav- og høyvann, samt årlig høyvann (stormflo). Vannstand i brønner viser respons på variasjon i elvenivå, som igjen påvirkes av tidevannsvariasjon. Forskjell mellom middel lavvann og middel høyvann er liten (ca. 20 cm) og gir tilsvarende begrenset døgnvariasjon i grunnvannstand, men vil ha større variasjon knyttet til perioder med vannstand i sjø/elv utover middelvariasjon, slik som perioden omkring 16-18. september vist i Figur 2-3.

I lys av nye innmålinger av nye og gamle brønner (se kap. 2.1), sammen med gjennomgang av nye og tidligere data for variasjoner i grunnvannsnivå, ser man et generelt lavere grunnvannsnivå for middelsituasjonen enn det som ble lagt til grunn for vurderingene i tiltaksplanen. Dette påvirker vurderingen av hvor stor andel av forurensingen som antas å befinne seg i hhv. umettet og mettet sone (over/under grunnvannsnivå) – se mengdeberegninger for PFAS i jord i kap. 3. Det bemerkes at grunnvannsnivå varierer med nivå i Topdalselva/Topdalsfjorden, og med årstider, og at middelsituasjonen derfor ikke må betraktes som en statisk størrelse gjeldende for et hvert tidspunkt gjennom en tiltaksperiode.

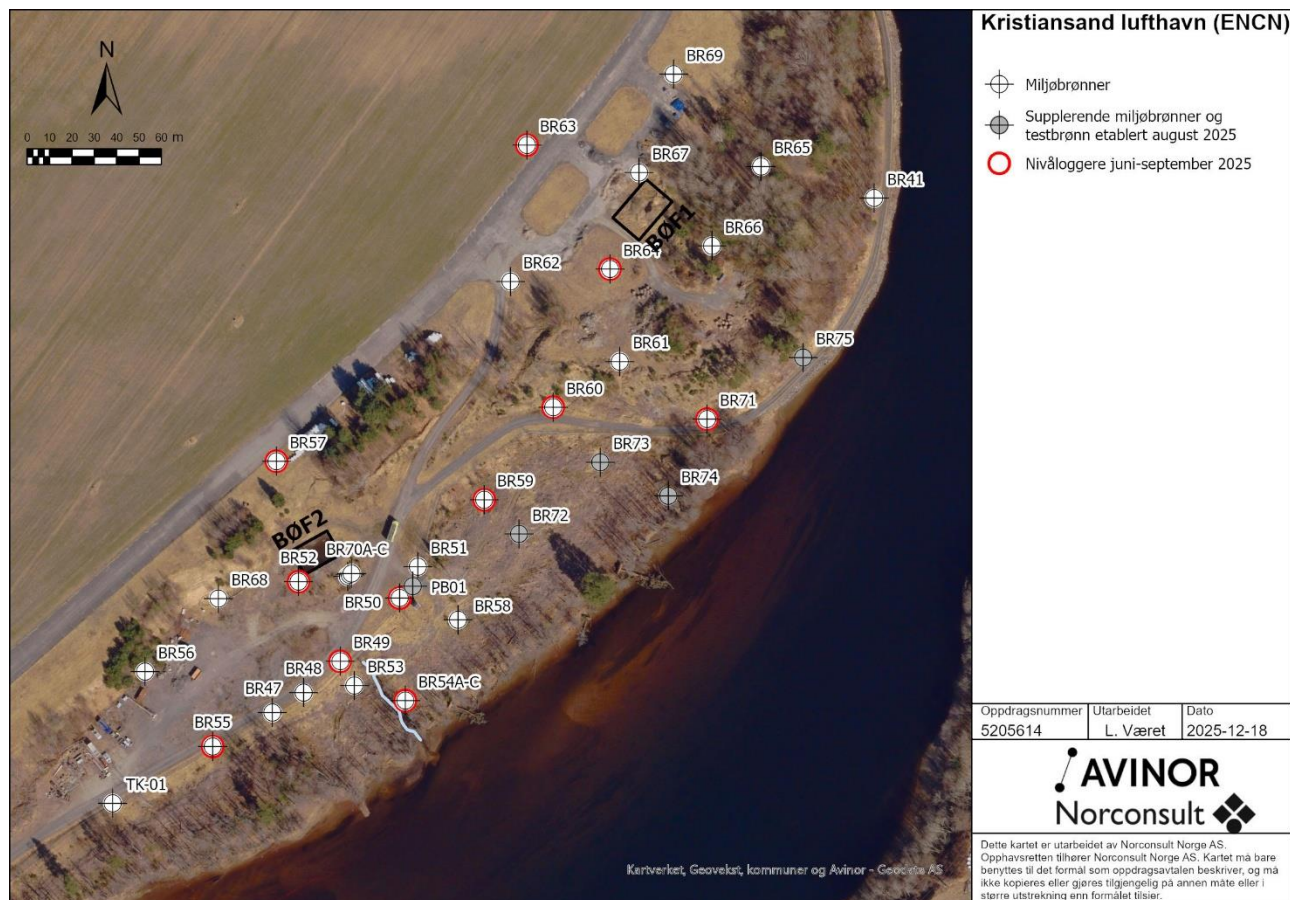


Figur 2-3: Variasjon i grunnvannstand i utvalgte brønner ved BØF1 og BØF2 i perioden 25. juni – 22. september 2025, målt med automatiske loggere med tidsoppløsning 10 minutter. Brønnenes plassering er vist i Figur 2-4. Nivåer for middelvann, middel lav-/høyvann og årlig høyvann er hentet fra Kartverkets tjeneste Se Havnivå [6]

Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04



Figur 2-4: Plassering av miljøbrønner, supplerende brønner etablert august 2025, samt utplassering av automatiske loggere for å måle variasjon i grunnvannstand over tid (Figur 2-3). Det er også målt vannstand i elva i samme periode. Måleren er plassert i båthuset om lag 200-250 m sørvest for BØF2.

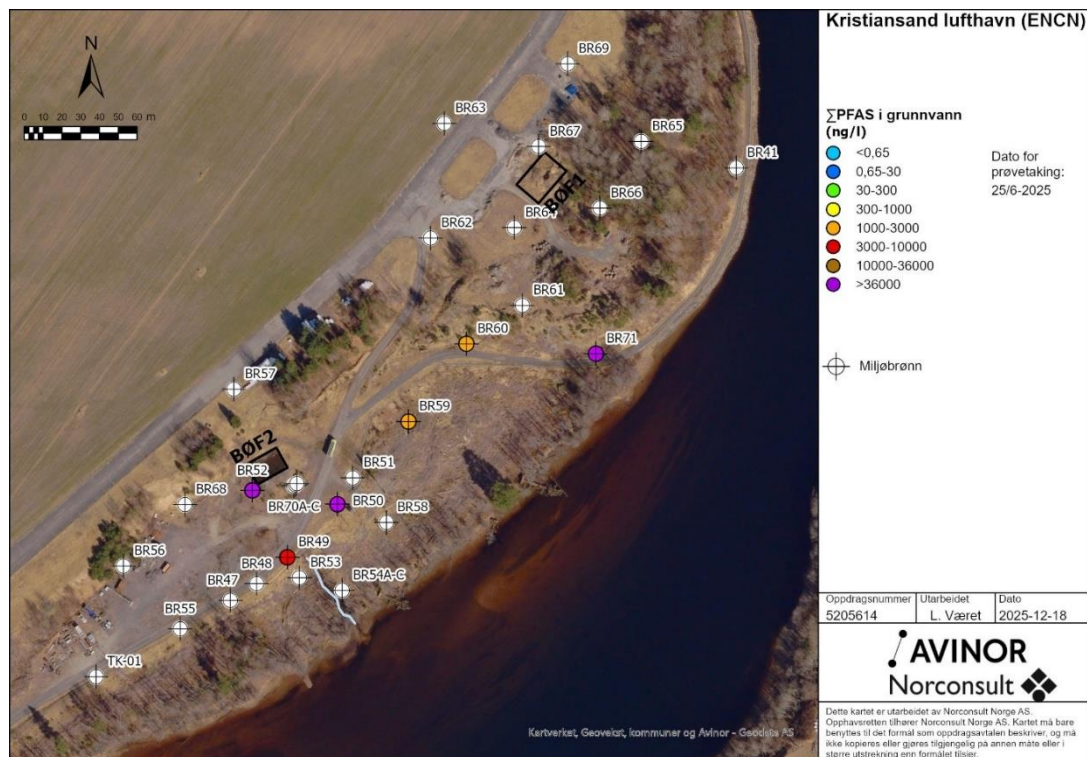
Supplerende prøvetaking grunnvann

Resultater for Σ PFAS i grunnvann i utvalgte brønner ved prøvetaking i juni og september 2025 er vist i hhv. Figur 2-5 og Figur 2-6. Påviste konsentrasjoner i tidligere etablerte miljøbrønner er på tilsvarende nivåer som ved tidligere prøvetaking i disse. Det henvises til tiltaksplan for oversikt over tidligere resultater [3].

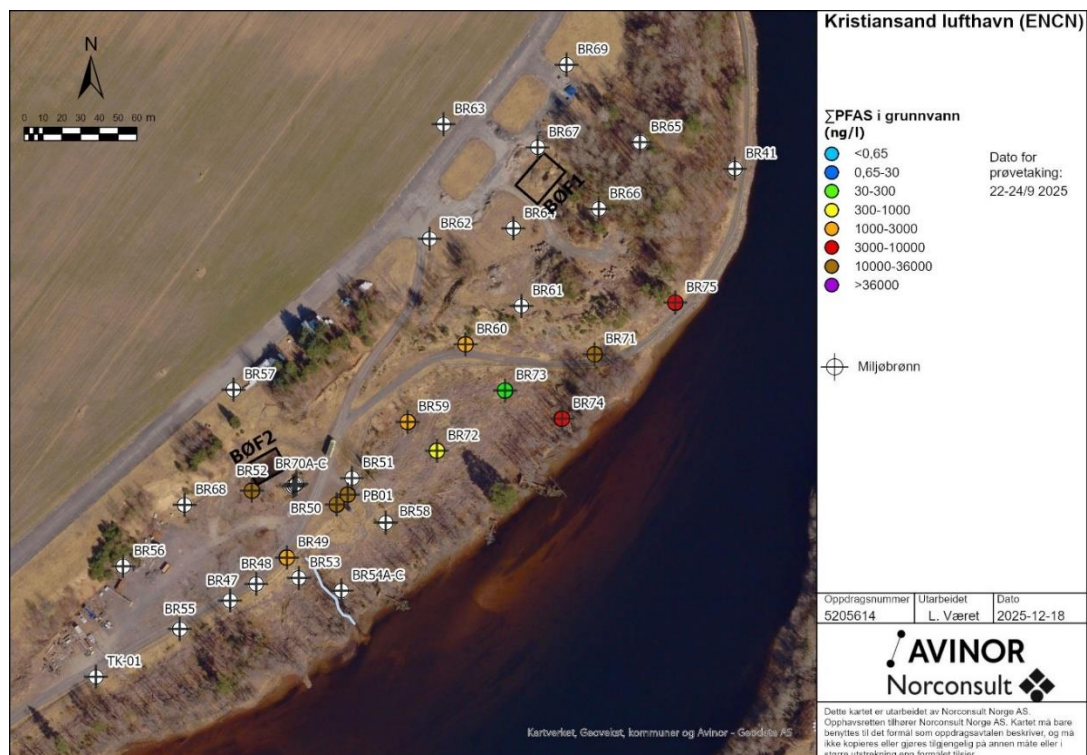
Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvningsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04



Figur 2-5: Konsentrasjoner av Σ PFAS (ng/l) i grunnvann ved prøvetaking av utvalgte brønner i juni 2025.



Figur 2-6: Konsentrasjoner av Σ PFAS (ng/l) i grunnvann ved prøvetaking av utvalgte brønner i september 2025.

3 Mengdeberegninger

3.1 Metode og forutsetninger

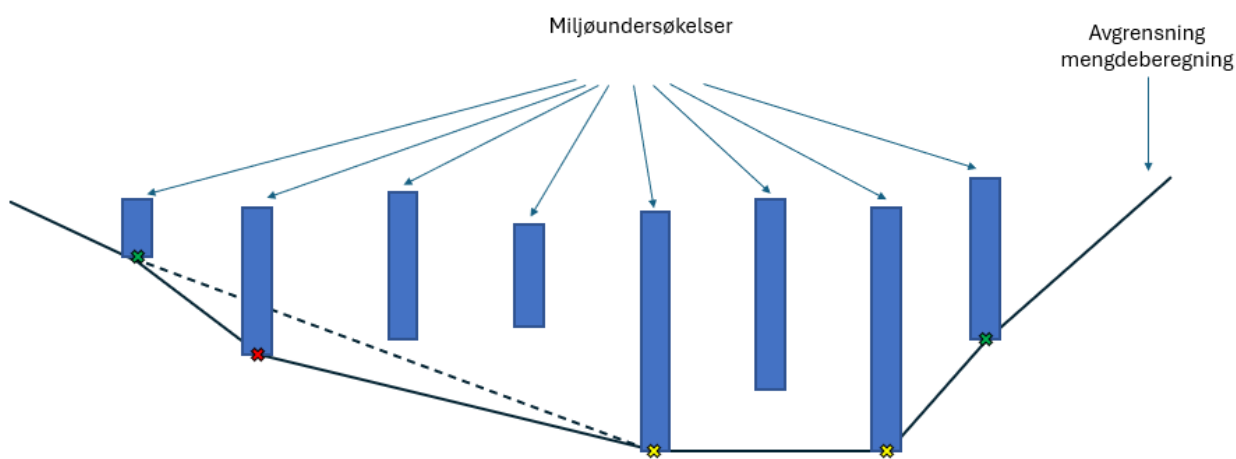
Formålet med beregningene av mengder Σ PFAS i jord er å gi et grunnlag for vurdering av forurensingssituasjonen, og for beregning av kost/effekt av tiltak i forbindelse med tiltaksvurderinger.

Interpolering og mengdeberegning av PFAS i jord er utført i 3D ved bruk av programvaren Leapfrog Works (ver. 2025.2, Seequent). Det er utarbeidet to modeller: 3D numerisk modell som representerer forurensingssituasjon i løsmasser; og 3D geologisk modell som representerer grunnvannsforhold. De to modellene er kombinert for å beregne mengde forurensning i løsmasser i umettet og mettet sone.

Mengden som er beregnet er for masser innenfor undersøkt areal og dyp, hvor det er påvist konsentrasjoner av PFOS/ Σ PFAS $>3 \mu\text{g/kg}$. For den numeriske modellen er det brukt en interpoleringsalgoritme av type «radial basis» [7]. 3D-modellens avgrensning ble valgt med utgangspunkt i prøvetakingslokasjoner og dybde. I kartvisning er den avgrenset av de ytterste prøvepunktene. Den vertikale avgrensningen av modellen er etablert ved å kombinere de dypeste, ytterste og supplerende prøvetakingspunktene. Dette sikrer en modellert undergrense med en realistisk geometri som i minst mulig grad overestimerer eller underestimerer mengden forurensede masser (se Figur 3-1).

Modellens vertikale avgrensning er basert på følgende typer miljøprøver:

- Dypeste prøver – fungerer som primære styringspunkter for maksimal dybde i modellen. Disse utgjør referansenivået for den laveste delen av modellbunnen (gule markører).
- Ytterste prøver – representerer de mest perifere prøvetakingspunktene og brukes for å gi modellbunnen en naturlig skålformet geometri i ytterkantene (grønne markører).
- Supplerende prøver – punkter som ikke er blant de dypeste eller ytterste, men som ligger dypere enn den interpolerte underflaten definert kun av dypeste og ytterste punkter (stiplet svart linje). Disse supplerende punktene (rød markør) er lagt inn for å forhindre en kunstig høy modellbunn og inngår i grunnlaget for endelig avgrensning brukt i mengdeberegningene.



Figur 3-1: Eksempelskisse som viser hvordan mengdeberegning av Σ PFAS i jord er avgrenset vertikalt i forhold til faktiske dybder for utført prøvetaking.

Den geologiske modellen for grunnvannsnivå over hele brannøvingsfeltet er utviklet basert på grunnvannsmålinger fra den 22. september 2025. Disse er representative for gjennomsnittlig målt

grunnvannstand med automatiske loggere utført over lengre tidsperiode som representerer variasjon over flere årstider.

For å beregne total mengde Σ PFAS, i både umettet og mettet sone i løsmasser, er det opprettet en blokkmodell i Leapfrog som er koblet til den numeriske modellen for forurensning, samt til den geologiske modellen for grunnvannsnivå. Den er definert med en fast celleinndeling (blokkstørrelse), hvor hver celle har en lengde på 1 m i X, Y og Z-retning. Hver celle tilegnes en konsentrasjonsverdi av Σ PFAS i henhold til utført interpolering. Total mengde Σ PFAS (kg) blir så beregnet med utgangspunkt i massevolum, gjennomsnittskonsentrasjon og massetetthet i henhold til følgende formel:

$$\text{Mengde } \Sigma\text{PFAS}_{\text{jord}} = \text{Volum masser} * \text{Gjennomsnittskonsentrasjon } \Sigma\text{PFAS} * \text{Massetetthet} * \text{Andel fraksjon} < 20 \text{ mm (\%)}$$

Det er i beregningene lagt til grunn en egenvekt av finsand på 1700 kg/m³ og en andel av fraksjon <20 mm i massene på 100%. For tidligere prøver som kun er analysert for PFOS er det tillagt en faktor 1,4, basert på gjennomsnittlig andel PFOS/ Σ PFAS på 0,7 i nyere prøver (basert på alle prøver fra begge feltene under ett).

Det understrekes at den numeriske modellen for jordforurensning er en forenkling, og at den kun gjenspeiler en tilnærming til de virkelige forholdene.

Det er usikkerheter knyttet til:

- Tetthet. Selv om det er høy prøvetetthet i området, er det relativt store avstander mellom punktene for modellering og interpolasjonen vil gi et forenklet bilde.
- Vertikal avgrensning. Er basert på maksimal prøvedybde, men forurensning kan forekomme dypere enn det som er prøvetatt.
- Valg av interpolasjonsmetode. «radial basis function» (RBF) er en kraftig metode, men resultatet er følsomt for valg av parametere, samt valget av lineær interpolant fremfor sfæroidal kan påvirke hvordan overganger mellom verdier modelleres.

3.2 Beregnede mengder

Interpolert konsentrasjonsfordeling for hhv. BØF1 og BØF2 er vist i Figur 3-2 og Figur 3-3, mens oppdatert beregning av mengder PFAS i jord for er oppsummert i Tabell 3-1 og Tabell 3-2.

Det er for BØF1 estimert en total mengde PFAS på 26,8 kg fordelt på totalt interpolert volum masser på om lag 273 000 m³, der ca. 95 % ligger over middel målt grunnvannstand (umettet sone). For BØF2 er estimert en total mengde PFAS på 9 kg, fordelt på et interpolert volum masser på om lag 67 500 m³, der ca. 85 % av forurensingen ligger over middel målt grunnvannstand (umettet sone).

For BØF2 er interpolerte volumer noe lavere enn angitt i tiltaksplanen, hovedsakelig som følge av justering av vertikal utstrekning for modellen. Interpolerte konsentrasjonsgrenser og interpolert gjennomsnittskonsentrasjon for ulike konsentrasjonsintervaller er også endret som følge av supplerende undersøkelser i jord sentralt på feltet.

I tiltaksplanen ble det estimert at >90% av forurensingen på BØF1 befinner seg i umettet sone, med en anbefaling om at et primærtiltak ved denne lokaliteten først og fremst må rettes mot å redusere utlekking og spredning fra forurensing i umettet sone. Oppdaterte mengdeberegning understøtter og forsterker denne anbefalingen.

For BØF2 ble det estimert at 60-65% av forurensningen ligger i umettet sone, men med en betydelig andel også i mettet sone. Det ble derfor vurdert som aktuelt med tiltak/tiltakskombinasjoner rettet mot både mettet

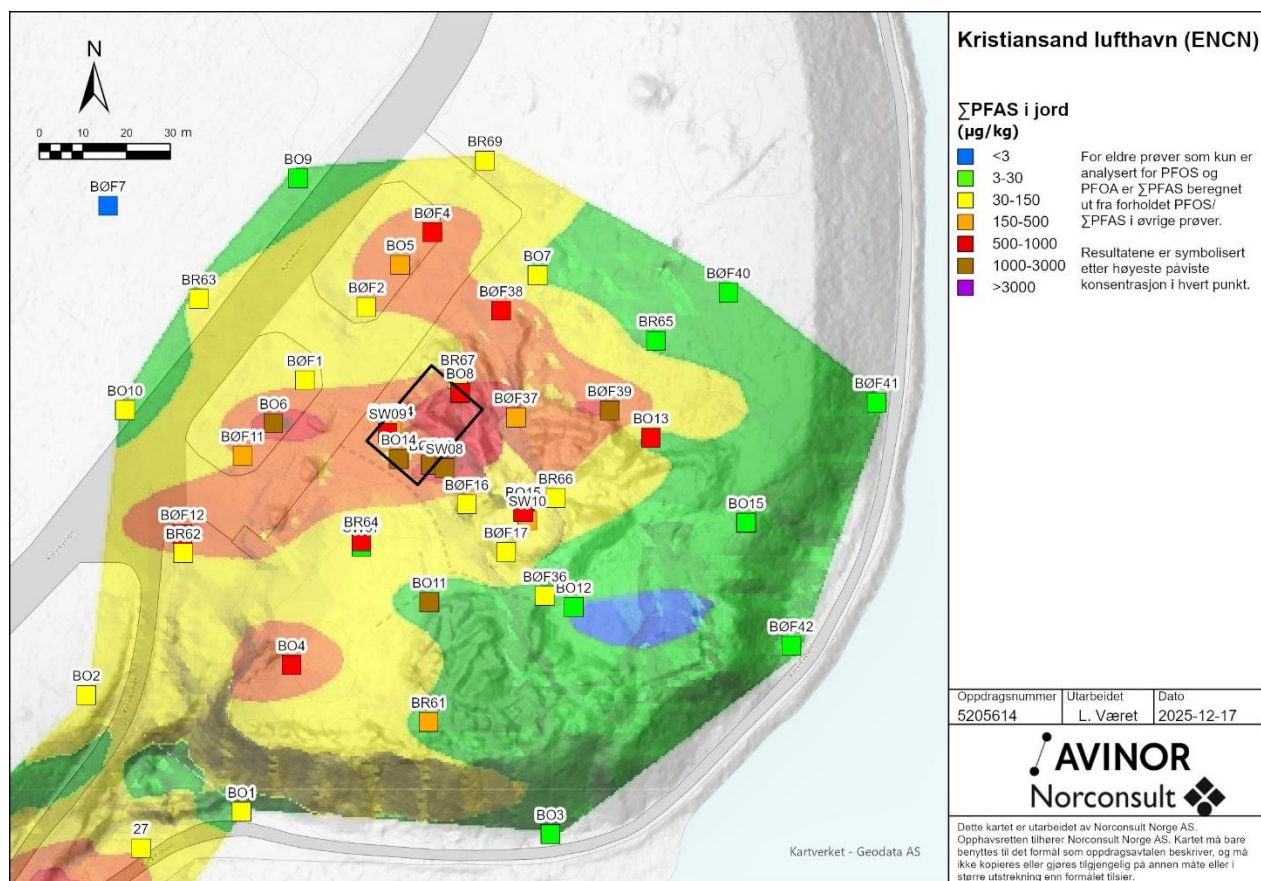
Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04

og umettet sone for størst mulig samlet tiltakseffekt. Oppdaterte beregninger av mengder i jord viser imidlertid at så mye som 85% av forurensingen ligger i umettet sone.

Det er i beregningene lagt til grunn interpolert grunnvannsspeil basert på målt grunnvannstand i alle brønner ved de nedlagte brannøvingsfeltene i september 2025. Disse målingene ligger nær gjennomsnittlig grunnvannstand målt med automatiske loggere i utvalgte brønner over en lengre periode (september 2015 - april 2016 og juni 2025 – september 2025).



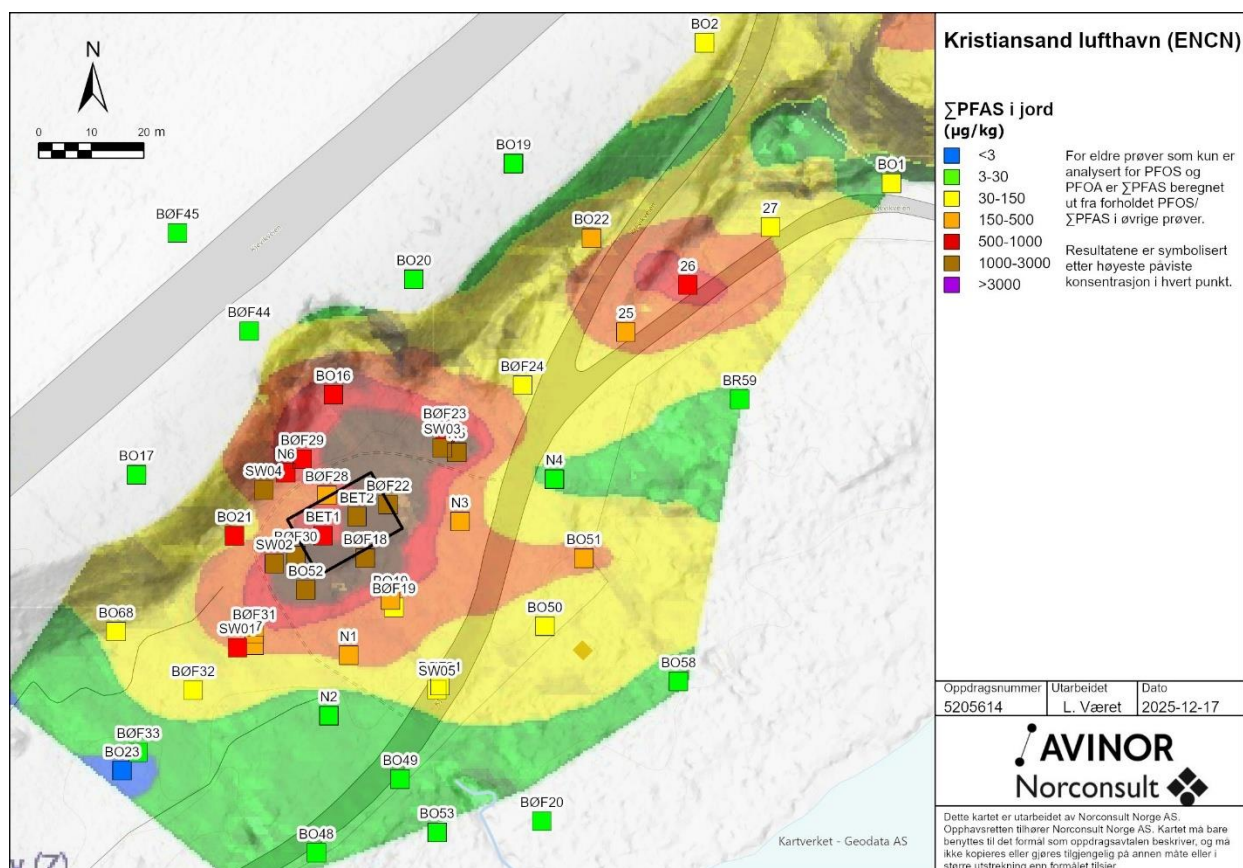
Figur 3-2: Interpolert konsentrasjonsfordeling for ΣPFAS (µg/kg) innenfor undersøkt areal ved gammelt brannøvingsfelt (BØF1), sett på overflaten med skyggerelieff i bakgrunnen.

Tabell 3-1: Beregnede mengder Σ PFAS (kg) og volum masser (m^3) for konsentrasjonsgrenser >3 , >30 , >100 , >150 , >500 , >1000 og $>3000 \mu g/kg$ ved gammelt brannøvingsfelt (BØF1). Beregning basert på interpolert konsentrasjonsfordeling innenfor undersøkt volum.

Kons. grense ΣPFAS	Areal	ΣPFAS _{gj.snitt}	Interpolert volum	Mengde PFAS	Andel av total mengde*	Mengde/ volum	Mengde PFAS umettet sone**	Mengde PFAS mettet sone**
(µg/kg)	(m2)	(µg/kg)	(m³)	(kg)	(%)	(g/m³)	(kg)	(kg)
>3	20 900	60	273 000	26,8	100 %	0,1	25,2	1,6
>30	14 250	120	119 800	23,4	87 %	0,2	22,5	0,8
>100	7800	220	43 200	16,2	60 %	0,4	15,9	0,2
>150	5650	280	26 300	12,7	47 %	0,5	12,5	0,1
>500	750	670	2150	2,4	9 %	1,1	2,4	-
>1000	65	1240	140	0,3	1 %	2,1	0,3	-
>3000	-	-	-	-	-	-	-	-

* Mengde PFAS innenfor gitt konsentrasjonsgrense, som andel av total mengde PFAS for lokaliteten (>3 µg/kg).

** Skille mettet/umettet sone er definert av interpolert grunnvannsspeil basert på målinger i september 2025, som nær tilsvarende gjennomsnittlig målt grunnvannsnivå i brønner på lokaliteten.



Figur 3-3: Interpolert konsentrasjonsfordeling for Σ PFAS ($\mu\text{g/kg}$) innenfor undersøkt areal ved sist nedlagte brannøvingsfelt (BØF2), sett på overflaten med skyggerelieff i bakgrunnen.

Tabell 3-2: Beregnede mengder Σ PFAS (kg) og volum masser (m^3) for konsentrasjonsgrenser >3, >30, >100, >150, >500, >1000 og >3000 $\mu\text{g/kg}$ for sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2). Beregning basert på interpolert konsentrasjonsfordeling innenfor undersøkt volum.

Kons. grense Σ PFAS ($\mu\text{g/kg}$)	Areal (m^2)	Σ PFAS _{gj.snitt} ($\mu\text{g/kg}$)	Interpolert volum (m^3)	Mengde PFAS (kg)	Andel av total mengde* (%)	Mengde/ volum (g/m^3)	Mengde PFAS umettet sone** (kg)	Mengde PFAS mettet sone** (kg)
>3	13 050	80	67 600	9,0	100 %	0,1	7,7	1,3
>30	8700	160	29 900	8,0	89 %	0,3	7,2	0,8
>100	4700	340	10 700	6,3	70 %	0,6	6,0	0,2
>150	3400	440	7 500	5,6	62 %	0,7	5,4	0,1
>500	1300	870	2150	3,1	34 %	1,4	3,1	-
>1000	470	1320	600	1,3	14 %	2,2	1,3	-
>3000	-	-	-	-	-	-	-	-

* Mengde PFAS innenfor gitt konsentrasjonsgrense, som andel av total mengde PFAS for lokaliteten (>3 $\mu\text{g/kg}$).

** Skille mettet/umettet sone er definert av interpolert grunnvannsspeil basert på målinger i september 2025, som nær tilsvarer gjennomsnittlig målt grunnvannsnivå i brønner på lokaliteten.

Det bemerkes at beregningene av volum forurensede masser og mengder PFAS innehar betydelig usikkerhet, og da særlig for beregninger knyttet til masser i skråningen nordvest for BØF2. Terrenget er bratt, med en høydeforskjell på omkring 8 m fra BØF2 (ca. kote +2) opp til overliggende terrengflate (ca. kote 10), og det er ikke gjennomført undersøkelser i selve skråningen. Forurensingsgrad i masser i skråningen er derfor ikke kjent, og beregning av mengde PFAS i disse massene er basert på interpolert konsentrasjonsfordeling, med bakgrunn i prøver fra prøvepunkter sørøst og nordvest for selve skråningen (Figur 3-3).

Gitt foreliggende modell for konsentrasjonsfordeling og volum masser, utgjør selve skråningen - avgrenset horisontalt av hhv. skråningsfot og skråningstopp, og vertikalt ned til undersøkt dyp - om lag 18 200 m^3 (Σ PFAS >3 $\mu\text{g/kg}$), tilsvarende ca. 1,8 kg PFAS. Av denne totale mengden viser modellen at ca. 2500 m^3 har en interpolert konsentrasjon av Σ PFAS >100 $\mu\text{g/kg}$, tilsvarende ca. 1,0 kg PFAS.

4 Hydrogeologisk modellering

4.1 Metode og forutsetninger

Geologisk modellering, som danner grunnlaget for numerisk modellering av grunnvannsstrømning, er utført i programvaren Leapfrog Works (versjon 2025.2, Seequent). Leapfrog-modellen er bygget på data fra miljøtekniske grunnundersøkelser og beskriver lagdelingen i prosjektområdet. For den tredimensjonale numeriske modelleringen av grunnvannsstrømning er det benyttet MODFLOW-2005 (versjon 1.12.00), en 3D endelig-differanse (*finite-difference*) modell som beregner grunnvannsstrømning ved å løse kontinuitetsligningen for vann, basert på en kombinasjon av Darcys lov og massebevaring. Modellen er satt opp og kjørt via det grafiske brukergrensesnittet ModelMuse (versjon 5.3.0.0).

Modellen simulerer grunnvannsstrømning ved brannøvingsfeltene og brukes til å vurdere om et tiltak med pumping av grunnvann fra brønner vil kunne avskjære den delen av grunnvannssonen som antas å bidra til spredning av forurensning (blandingssonen, antatt 4 m) og sende dette til renseanlegg, og derigjennom forhindre/begrense at forurenset grunnvann når resipient (Topdalselva). Det bemerkes at modellen kun omfatter grunnvannsstrømning, og sier derfor ikke noe om prosesser knyttet til utlekking eller spredning, og derfor heller ikke effekt av tiltak. Modellen gir imidlertid grunnlag for å kvantifisere vannbalanse og forstå grunnvannstrømning i det aktuelle området, og resultatene inngår som del av grunnlag for oppdaterte spredningsberegninger i kap. 5. Effekt av spredningsreducerende tiltak tar utgangspunkt i beregnet spredning under dagens situasjon, og er omtalt for de ulike tiltaksalternativ i kap. 0.

Modellutstrekningen ble valgt ut fra områdets avgrensning mot sjølinjen og elven (Figur 4-1), for å sikre realistiske grensebetingelser i modellen. Modellens grid er delt inn i 5 m² rutenett.

Basert på kornfordelingsanalyser gjort på utvalgte prøver består massene i områdene generelt av ensgradert middels til grov sand, med stedvis noe innhold av finstoff. Det er i modellen lagt til grunn sannsynlige gjennomsnittsverdier for hydraulisk ledningsevne (K) for sand basert på kornfordelingskurver og slug tester, som senere er justert under kalibreringsprosessen. Anisotropien i modellen er representert ved å redusere den vertikale hydrauliske ledningsevnen til halvparten av den horisontale, slik at K_z settes til $K_x/2$. Det er skilt mellom området der det foreligger kornfordelingsanalyser og slug tester, og hvor spennvidden i hydraulisk ledningsevne derfor er relativt godt kjent, samt området der slike data ikke finnes og ledningsevnen er mer usikker. Oransje polygon (Figur 4-1) markerer området der den hydrauliske ledningsevnen (K) er kjent. I dette området er en gjennomsnittsverdi for K på 4E-04 m/s tildelt fra terrengoverflaten ned til 5 m under grunnvannsnivået. Under dette nivået, samt i resten av modellområdet, er det benyttet en lavere K-verdi tilsvarende 1E-04 m/s

Modellen bruker likevekts-/stasjonære- (steady-state) simulering for å etterligne dagens forhold og tidsavhengig (transient) simulering for modellering av tiltakets innvirkning på grunnvannsstrømning. For å definere hvordan grunnvann kan strømme inn og ut av modellområdet, og for å sikre en fysisk realistisk representasjon av grunnvannsstrømningen, er det tildelt grensebetingelser i modellen.

Recharge (RCH) er tildelt de øverste aktive cellene (topp aktive celler i den mettede sonen, der modellen faktisk beregner strømning) over hele modellens overflate. Infiltrasjonen er satt til 90 % av gjennomsnittlig overflateavrenning (950 mm/år; NEVINA) ettersom det er forholdsvis flatt terreng og løsmasser med høy hydraulisk ledningsevne. Lyseblå polygon (Figur 4-2) viser området der infiltrasjonsgrensebetingelsen er pålagt over hele arealet, med en infiltrasjonsrate på 2,3E-03 m/d.

Constant Head (CHD) er tildelt langs hele Topdalselva innenfor modellområdet for å representere et pålagt konstant trykspotensial. Mørkeblå polygon (Figur 4-2) viser området der Constant Head-grensebetingelsen er satt til 0,05 m over havet, en verdi som tilsvarer gjennomsnittlig nivå målt med vannstandslogger i elva.



Figur 4-1: Modellens utstrekning er markert med rødt polygon. Svarte polygoner viser ca. plassering på BØF1 (nordøst) og BØF2 (sørvest), mens oransje polygon viser området der det er utført kornfordelingsanalyser og slug tester. Svarte punkter står for brønner der det er utført kornfordelingsanalyser/slug tester.

Modellens yttergrenser som ikke er tildelt spesifikke grensebetingelser er definert som **no-flux**. Lokalisering av grensebetingelsene i modellen er vist i Figur 4-2.

For å representere tiltaket i den tidsavhengige modellen er det implementert en **Specified Flow (FHB)** grensebetingelse for pumpebrønnene (Figur 4-2 – blå punkter). I tillegg er **Recharge (RCH)** satt til 0 m/d under tildekkingsområdet (Figur 4-2 – lilla polygon), som dermed fungerer som en barriere mot infiltrasjonsdrevet nydannelse av grunnvann.



Figur 4-2: Tildelte grensebetingelser i modellen; lyseblå polygon – infiltrasjon (RCH); mørkeblå polygon – konstant trykktensial (CHD); lilla polygon – tiltak, tildekking i tidsavhengig simulering (RCH); blå punkter – tiltak, pumpebrønner i tidsavhengig simulering (FHB).

Det er utført kalibrering av inputparameterne i den numeriske modellen for å redusere usikkerhet i parametre som påvirker modellresultatene, sikre at simulerte grunnvannsnivåer samsvarer med observerte nivåer, og for å justere modellen slik at den er egnet til dimensjonering og vurdering av tiltaket.

Modellert trykktensial er kalibrert mot observerte grunnvannstrykk. Det er valgt ut 7 brønner (BR49, BR50, BR52, BR54A, BR55, BR57 og BR59) med lengste tilgjengelige tidsserier med målt trykktensial, som dekker tilnærmet ett helt år. Det opprinnelig modellerte trykktensialet i modellen var 0,15 – 0,5 m høyere enn målte verdier. For å oppnå bedre samsvar er den hydrauliske ledningsevnen (K) for sand i det kjente området redusert fra 4E-04 m/s til 2E-04 m/s, mens K i det ukjente området er redusert fra 1E-04 m/s til 5E-05 m/s.

Før kalibrering var differansen mellom målt og modellert trykktensial i brønnene mellom 0,15 og 0,49 m. Etter kalibrering ble avvikene redusert betydelig og ligger mellom 0,00 og 0,06 m. Det største gjenværende avviket er observert i BR57 og utgjør 0,06 m.

Den kalibrerte modellen i likevektstilstand er videre benyttet som utgangspunkt for simulering av tiltaket i tidsavhengig tilstand.

4.2 Modellerte scenarier

Modellen inkluderer simulering av grunnvannsstrømning for fem ulike scenarier, hvor tre scenarier representerer tiltak ved BØF1 og to scenarier representerer tiltak ved BØF2. Scenariene skiller seg fra hverandre med hensyn til antall pumpebrønner, avstand mellom brønnene, brønndybde og pumperate.

Ved modelleringen av scenariene har hovedfokuset vært å sikre at det optimaliserte P&T-tiltaket oppnår færrest og grunnest mulig brønner, lavest mulig total pumperate og kortest varighet for å fjerne ett porevolum av forurenset grunnvann. I tillegg har det vært et sentralt mål å begrense andelen rent vann som pumpes opp – enten dette kommer fra Topdalselva eller fra dypere nivåer som ikke er forurenset – slik at en størst mulig andel av det oppumpede vannet faktisk utgjør forurenset grunnvann.

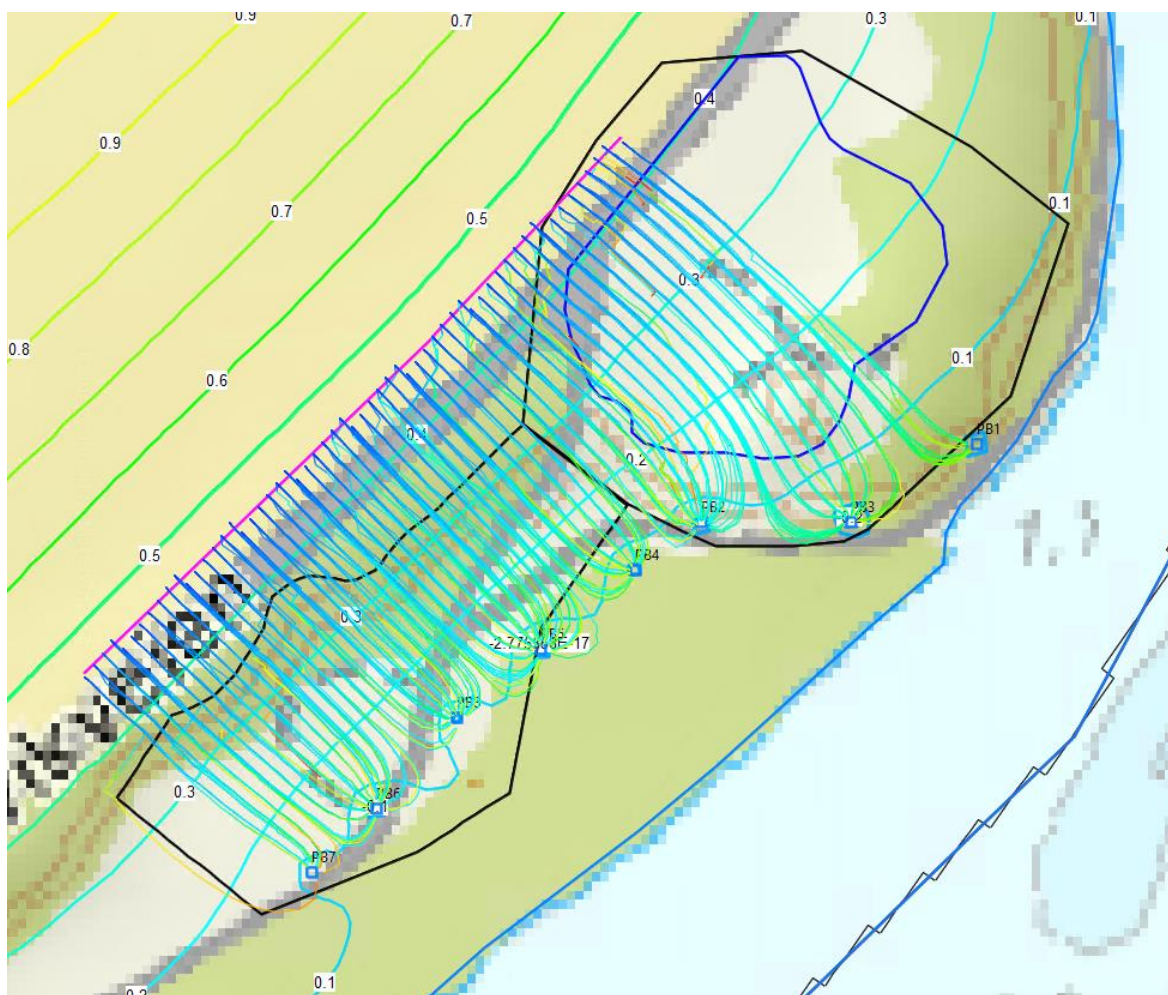
For beregning av mengden forurenset vann som pumpes opp fra BØF1 og BØF2, er arealavgrensningen fra polygonene vist i Figur 4-3 benyttet som grunnlag for å definere forurensningsutbredelsen i kartvisning. Polygonene dekker området der det er påvist forurensning >1000 ng/l (se Figur 2-5 og Figur 2-6 for målte konsentrasjoner i grunnvann 2025, samt Figur 9-7 i tiltaksplan for interpolert konsentrasjonsfordeling [3]). I dybde er forurenset sone avgrenset til 4 m under grunnvannsnivået, ettersom forurensningen antas å ligge innenfor dette intervallet.



Figur 4-3: Polygoner som er brukt for beregning av mengde forurenset vann som pumpes ut; oransje polygon – utbredelsen av påvist forurensning >1000 ng/l ved BØF1; gul polygon - utbredelsen av påvist forurensning >1000 ng/l ved BØF2.

4.3 Modelleringsresultater

Figur 4-4 viser resultater fra den tidsavhengige modelleringen som simulerer effekten av de planlagte tiltakene, det vil si pumpebrønner og tildekking. Modelleringen viser at man, med dimensjonert antall brønner (8 brønner), brønnplassering som vist i Figur 4-4, tilpasset brønnndybde (4,0 - 5,0 m) og pumperater (0,25 - 0,35 l/s), oppnår fullstendig avskjæringseffekt og dermed hindrer videre transport av forurensning mot resipienten. Dette er kontrollert gjennom funksjonen *forward particle tracking* i modelleringsverktøyet, der «partikler» legges inn i den antatte blandingssonen (4 m) oppstrøms det forurensede området, og viser hvordan disse beveger seg med grunnvannet når tiltaket er aktivt (Figur 4-4).



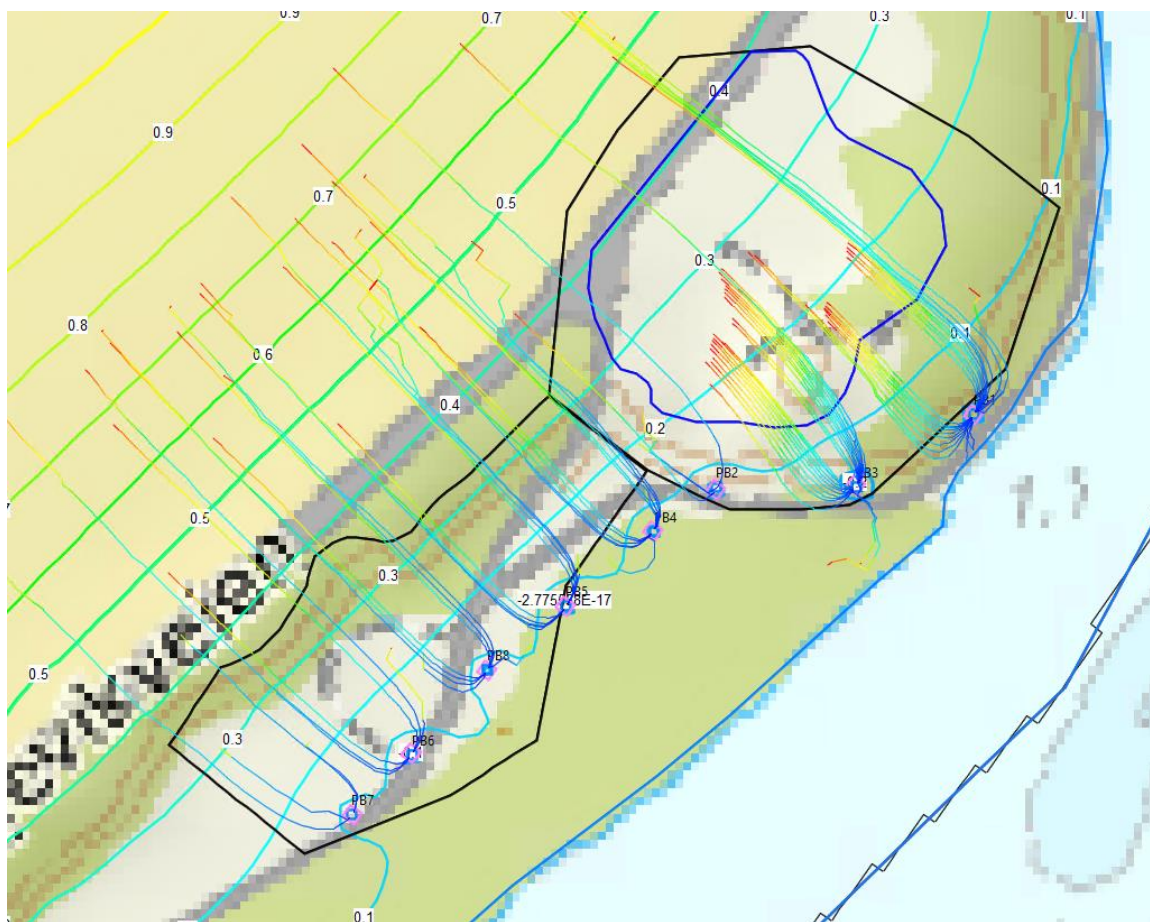
Figur 4-4: Resultater fra den tidsavhengige simuleringen av tiltaket og bruk av funksjonen *forward particle tracking* i modelleringsverktøyet. «Partikler» er lagt inn oppstrøms det forurensede området (illustrert med lilla linje), og linjer (fargeskala blå til grønn) viser hvordan disse følger grunnvannet i den antatte blandingssonen (4 m) mot pumpebrønnene (blå firkanter) når tiltaket er aktivt, uten å nå Topdalselva nedstrøms. Blått polygon = tildekking BØF1.

Figur 4-5 viser resultater ved bruk av funksjonen *backward particle tracking* i modelleringsverktøyet, der «partikler» plasseres i brønnene og spores bakover i tid for å vise hvor brønnene trekker vann fra (illustrert med linjer fra brønnene). Resultatene viser at kun en liten andel av partiklene som ender i PB1 har opprinnelse fra elven. For PB3 fremgår det at brønnen delvis påvirker grunnvannet nedstrøms for sin

plassering, men den trekker ikke ellevann. De øvrige pumpebrønnene trekker kun inn grunnvann fra oppstrøms områder, uten bidrag fra elven.

Oppsummert viser simulering av tiltak med gitt brønnkonfigurasjon og pumperater at brønnene vil avskjære grunnvannsstrømmen i den antatte blandingssonen (4 m) nedstrøms forurensset området, og at brønnene primært vil samle forurensset grunnvann med svært begrenset bidrag fra Topdalselva.

Tabell 4-1 oppsummerer dimensjonert antall brønner, pumperater og tilpasset brønn/filterdyp.



Figur 4-5: Resultater fra den tidsavhengige simuleringen av tiltaket gjennom funksjonen backward particle tracking i modelleringsverktøyet. «Partikler» spores bakover i tid (linjer i fargeskala blå til rød) fra brønnene, og viser at kun PB1 nærmest elva i nordøst trekker noe vann fra Topdalselva, under den gitte brønnkonfigurasjonen og pumperatene som ligger til grunn for simuleringen. Blå polygon = tildekking BØF1.

Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04

Tabell 4-1: Oppsummering av antall brønner, estimert pumperate per brønn, og brønn/filterdyp (se Figur 4-3 og Figur 4-4 for brønnenes plassering).

Pumpebrønn	Pumperate (l/s)	Brønnedyp (mut)	Filterdyp (mut)
PB1	0,25	4,0	1,0 - 4,0
PB2	0,25	5,0	2,0 - 5,0
PB3	0,30	4,0	1,0 - 4,0
PB4	0,25	4,0	1,0 - 4,0
PB5	0,35	4,0	1,0 - 4,0
PB6	0,35	4,0	1,0 - 4,0
PB7	0,25	4,0	1,0 - 4,0
PB8	0,25	4,0	1,0 - 4,0

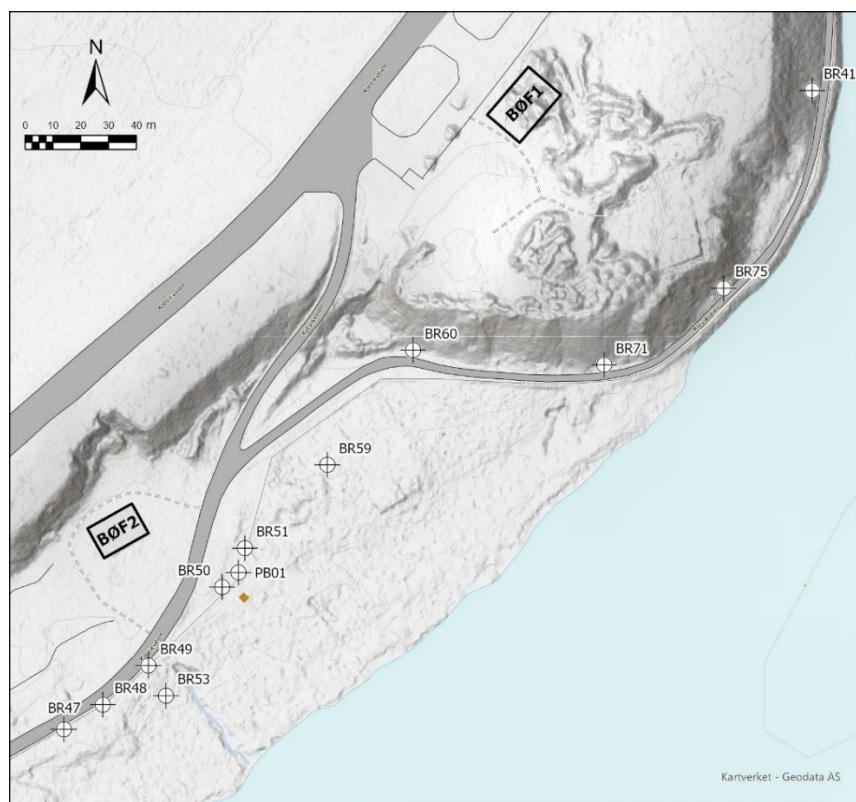
5 Spredningsberegninger

For oppdatert beregning av spredningsmengder er det lagt til grunn vannmengder hentet fra numerisk modell for grunnvannsstrømning (kap. 4), samt målte konsentrasjoner av Σ PFAS i grunnvann. For vannmengder er det lagt til grunn en blandingssone på 4 m, og det er simulerte vannmengder gjennom denne mektigheten fra hvert av brannøvingsfeltene til Topdalselva som inngår i beregningene. For konsentrasjon av Σ PFAS i grunnvann er det lagt til grunn gjennomsnittlig grunnvannskonsentrasjon basert på målte konsentrasjoner i brønner som antas å representere utstrømmende grunnvann nedstrøms hvert av feltene. Brønner som inngår i beregning av gjennomsnittlig grunnvannskonsentrasjon er indikert i Figur 5-1.

Oppdaterte spredningsmengder er oppsummert i Tabell 5-1.

Tabell 5-1: Oppdaterte spredningsberegninger for dagens situasjon ved BØF1 og BØF2.

		BØF1	BØF2
Vannmengde (fra numerisk strømningsmodell)	(m ³ /d)	29	39
	(l/år)	10585000	14235000
Σ PFAS (gj.sn.)	(ng/l)	15740	9800
Spredning	(g/år)	170	140
Spredning totalt	(g/år)	310	



Figur 5-1: Brønner som er inkludert for å estimere gjennomsnittskonsentrasjon av Σ PFAS (ng/l) i utstrømmende grunnvann, som grunnlag for oppdatert beregning av spredningsmengder.

Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04

Spredningsberegningene er utført med forutsetninger som angitt over, og innehar usikkerheter knyttet til alle deler av beregningene. Beregningene er utført som en gjennomsnittsbetraktning for delområder (hhv. BØF1 og BØF2), samt hydraulisk ledningsevne og et antatt blandingsdyp innenfor disse, og vil derfor ikke fange opp eventuell inhomogenitet, variasjon i grunnvannskonsentrasjon eller foretrukne strømnings- og spredningsveier innenfor hver av disse. Estimert effekt av tiltak rettet mot begrenning av spredning i mettet sone, slik som f.eks. grunnvannsrensing eller reaktiv barriere, tar direkte utgangspunkt i beregnet spredning for dagens situasjon. Usikkerhet i spredningsberegningene vil derfor følge med inn i beregning av tiltakseffekt.

6 Tiltaksalternativer

Ved sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2) er det gjennom oppdaterte mengdeberegninger (kap. 3) beregnet totalt 9,0 kg PFAS i jord innenfor et totalt volum masser på 67 600 m³. Den største andelen av forurensingen ligger i umettet sone eller i overgangen til mettet sone² (7,7 kg av totalt 9,0 kg). Dette tilsier at en større andel av forurensningen ligger i umettet sone, sammenliknet med det som ble lagt til grunn i tiltaksplanen (6,2 kg i umettet sone av totalt 10,1 kg) [3], og at et tiltak som retter seg mot umettet sone vil kunne ha en relativt stor tiltakseffekt. Uavhengig av dette, så vil det for denne lokaliteten fortsatt være aktuelt med tiltak/tiltakskombinasjoner rettet mot både umettet og mettet sone for størst mulig samlet tiltakseffekt. Dette gjelder særlig dersom man ser begge brannøvingsfeltene under ett, hvor et spredningsreduserende tiltak som retter seg mot mettet sone vil kunne omfatte begge feltene uten nødvendigvis å innebære en betydelig merkostnad.

Oppdaterte spredningsberegninger (kap. 5) viser en samlet spredning fra begge brannøvingsfeltene på om lag 310 g PFAS/år, hvorav 170 g/år fra BØF1 og 140 g/år fra BØF2. Dette er en lavere spredningsmengde enn det som ble beregnet i tiltaksplanen, noe som tilsier mulig lavere årlig effekt og behov for lengre varighet av et tiltak med rensing av grunnvann dersom dette utføres som eneste tiltak for BØF2.

Det er i oppdaterte tiltaksvurderinger vurdert følgende tiltaksalternativer eller kombinasjoner av disse:

Alternativ A: Rensing av grunnvann

Alternativ A1: Rensing av grunnvann BØF 1 og BØF2

Alternativ A2: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Alternativ A3: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (*lite omfang*)

Alternativ A4: Rensing av grunnvann BØF og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (*middels omfang*)

Alternativ B: Reaktiv barriere

Alternativ B1: Reaktiv barriere BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Alternativ B2: Reaktiv barriere BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Alternativ C: Oppgraving med ekstern deponering

Alternativ D: Tildekking BØF2

De enkelte tiltaksalternativene er nærmere beskrevet i påfølgende delkapitler.

² Det er ved beregning av mengder i umettet og mettet sone tatt utgangspunkt i gjennomsnittlig målt grunnvannsnivå i brønner på lokaliteten. Grunnvannsnivå vil imidlertid variere, og en større andel av beregnet mengde vil ligge i mettet sone ved høyt grunnvannsnivå.

6.1 Alternativ A: Rensing av grunnvann

Et tiltak med rensing av grunnvann innebærer avskjæring og uttak av utstrømmende grunnvann nedstrøms forurensede område for behandling i renseanlegg før utslipp til resipient («pump and treat»).

For et tiltak med rensing av grunnvann er det vurdert to alternativer:

Alternativ A1: Rensing av grunnvann BØF 1 og BØF2

Tiltaksalternativ A1 omfatter rensing av grunnvann ved BØF1 og BØF2. Dette alternativet er tilsvarende det tiltaket som ble foreslått i tiltaksplanen [3], hvor rensing av grunnvann ved begge BØF ble foreslått i kombinasjon med tildekking av masser ved BØF1 (sistnevnte er prosjektert og tilbudskonkurranse for utførelse av tiltaket er utlyst i markedet). Tiltaksalternativ A1 vil da innebære rensing av utstrømmende grunnvann fra både BØF1 og BØF2 innenfor et område med forventede konsentrasjoner av Σ PFAS i grunnvann >1000 ng/l (se kap. 4).

Effekt av et tiltak med rensing av grunnvann er oppad begrenset til samlet spredningsmengde. Med en relativt lav beregnet årlig spredningsmengde fra de to brannøvingsfeltene (310 g/år, jf. kap. 5), vil dette også innebære at potensiell effekt av et tiltak med rensing av grunnvann i form av mengde PFAS hentet ut gjennom rensing, vil være begrenset. Gitt betydelige usikkerheter i beregning av spredningsmengder, vil det også være tilsvarende usikkerhet i effekt for et tiltak med rensing av grunnvann. Dette knytter seg også til betydelige usikkerheter i hvordan spredningen vil utvikle seg over tid.

Ved etablering av brønner som ved pumping fanger det meste av det forurensede grunnvannet fra sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), og ved drift av vannrenseanlegget på en måte som gjør at man klarer å opprettholde en høy rensegrad for PFAS, er det forventet at tiltaket vil kunne redusere årlig spredning fra begge brannøvingsfeltene med minimum 90% sammenlignet med dagens situasjon. Samlet effekt over tid vil avhenge av varighet av tiltaket, og faktisk utforming av tiltaket med tanke på plassering av brønner og pumperater. Dette er noe man vil måtte se nærmere på i videre prosjektering. Som en forenklet tilnærming er det i videre beregninger lagt til grunn at spredningsmengden er konstant over tid, selv om denne mest sannsynlig vil avta ved lenger varighet av et tiltak. Dette gjør at effekt for tiltak med lenger varighet (>20 år) sannsynligvis er noe overestimert.

Det er for beregninger av forventet effekt for tiltaksalternativ A1 lagt til grunn en årlig effekt tilsvarende 90% av estimert spredningsmengde fra BØF1 og BØF2 for de første 13 år. Ved varighet >13 år er det antatt at spredningen fra BØF1 har avtatt betydelig som følge av gjennomført tildekkingstiltak. For varighet av tiltak >13 år er det derfor kun lagt til grunn effekt i form av spredningsreduksjon fra BØF2. Samlet viser utførte beregninger av forventet effekt at et tiltak med rensing av grunnvann som eneste tiltak på BØF2 vil måtte gå over en periode på mer enn 40 år for å fjerne minst 80% av total mengde PFAS i jord på lokaliteten (Figur 6-1).

Alternativ A2: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Som vist for tiltaksalternativ A1 er det forventet at et tiltak med rensing av grunnvann som eneste tiltak ved BØF2, vil måtte gå over svært lang tid for å fjerne en tilstrekkelig høy andel av total mengde PFAS i jord på lokaliteten. Det er også for et slikt tiltak knyttet betydelig usikkerhet til effekt ved såpass lang varighet av tiltaket.

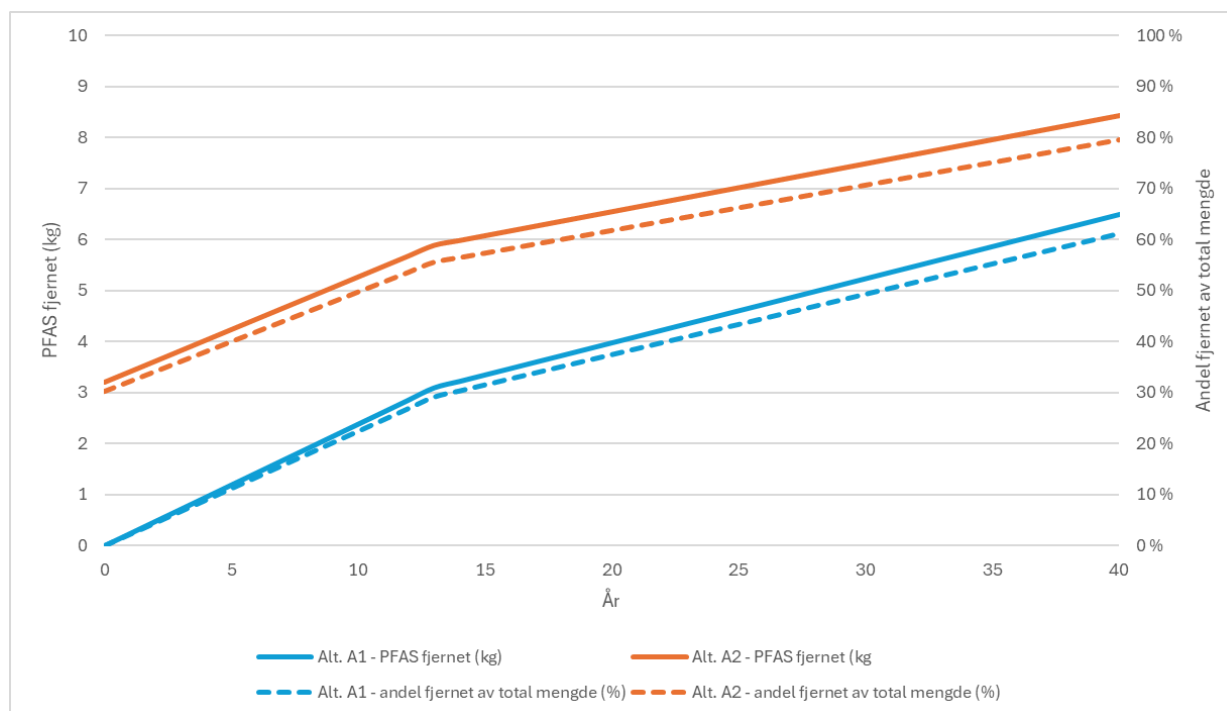
Som et alternativ til rensing av grunnvann som eneste tiltak, er det derfor vurdert et tiltaksalternativ A2 der rensing av grunnvann kombineres med utgraving av «hot spot» på BØF2, hvor «hot spot» BØF2 her er definert som masser i umettet sone med konsentrasjon av Σ PFAS >500 μ g/kg. Samlet effekt for et slikt

tiltaksalternativ vil være tilsvarende summen av mengde PFAS (kg) i masser med konsentrasjon av Σ PFAS >500 µg/kg (se Figur 3-3 for interpolert konsentrasjonsfordeling i jord) og mengde PFAS (kg) hentet ut i vannrenseanlegg gjennom tiltakets varighet.

Mengde PFAS i masser i umettet sone med konsentrasjon av Σ PFAS >500 µg/kg er beregnet til 3,1 kg, noe som tilsvarer om lag 34% av total mengde PFAS i jord på BØF2 (jf. Tabell 3-2).

Effekt av rensing av grunnvann for et slikt kombinasjonstiltak er vanskeligere å estimere. Oppgraving og fjerning av de sterkest forurensede massene i umettet sone, vil bidra til å redusere utlekkingen av PFAS fra umettet til mettet sone. Dette gjør at mengde PFAS i grunnvannet som vil kunne hentes ut gjennom et tiltak med rensing av grunnvann over tid forventes å avta.

Det er for samlet effekt av et tiltaksalternativ A2 lagt til grunn en årlig spredningsmengde tilsvarende 75% av dagens spredningsmengde som følge av tiltaket som retter seg mot umettet sone. Videre legges det til grunn 90% rensegrad i vannrenseanlegget for denne spredningsmengden. I tillegg til dette kommer de 3,1 kg PFAS som fjernes gjennom utgraving av «hot spot» BØF2. Med disse forutsetningene viser utførte beregninger at rensing av grunnvann for tiltaksalternativ A2 vil måtte gå over en periode på nærmere 40 år for å fjerne minst 80% av total mengde PFAS i jord på lokaliteten (Figur 6-1).



Figur 6-1: Forventet akkumulert effekt (kg PFAS) av et tiltak med rensing av grunnvann ved BØF1 og BØF2 ved ulike varighet av tiltak, sammen med andel PFAS fjernet (%) av total mengde i jord (mettet sone BØF1 og umettet/mettet BØF2), for tiltaksalternativer A1 og A2. Det er for begge tiltaksalternativer lagt til grunn tilleggseffekt i form av spredningsreduksjon fra BØF1 for første 13 år (markert med «knekkpunkt» i figur).

Alternativ A3: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (lite omfang)

Tiltaksalternativ A3 omfatter rensing av grunnvann ved BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking av masser på BØF1. Det er for dette alternativet lagt til grunn tildekking av masser over et areal på 1640 m², heretter omtalt som *lite omfang* (Figur 6-2).

Tildekking av masser er en tiltaksløsning som vil ha effekt i form av å redusere infiltrasjon av vann og derigjennom redusere utlekking av PFAS fra masser i umettet sone innenfor tildekket areal. Dette vil da gjelde for masser som ligger i umettet sone over nivå for normal grunnvannsvariasjon, og som i praksis i svært liten grad forventes å ville komme i kontakt med vann (med unntak for ekstremhendelser). Det er i de videre vurderingene av effekt lagt til grunn at en tildekking vil bidra til å immobilisere den mengde PFAS som ligger i masser over nivå for årlig høyvann (stormflo). Dette betyr at mengden PFAS som immobiliseres gjennom tildekking vil være noe lavere enn den mengde som er oppgitt å ligge i umettet sone dersom det legges til grunn en beregning basert på gjennomsnittlig målt grunnvannsnivå (jf. Tabell 3-2).

Mengde PFAS i masser i umettet sone (over nivå for årlig høyvann) innenfor tildekket areal for tiltaksalternativ A3 er beregnet til 3,9 kg, noe som tilsvarer om lag 37% av total mengde PFAS i jord på BØF2 (umettet og mettet sone) og BØF1 (mettet sone).

Det er for samlet effekt av et tiltaksalternativ A3 lagt til grunn at årlig spredningsmengde fra BØF2 vil reduseres til 75% av dagens spredningsmengde, dvs. om lag 100 g/år, som følge av tildekking av masser i umettet sone. Videre legges det til grunn 90% rensegrad i vannrenseanlegget for denne spredningsmengden (90 g/år). I tillegg til dette kommer de 3,9 kg PFAS som immobiliseres gjennom tildekking av masser (lite

omfang) ved BØF2. Med disse forutsetningene viser utførte beregninger at rensing av grunnvann for tiltaksalternativ A3 vil måtte gå over en periode på om lag 30 år for å fjerne minst 80% av total mengde PFAS i jord på lokaliteten (Figur 6-3).

Alternativ A4: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (middels omfang)

Tiltaksalternativ A4 omfatter rensing av grunnvann ved BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking av masser på BØF1. Det er for dette alternativet lagt til grunn tildekking av masser over et areal på 2600 m², altså over et større areal sammenliknet med tiltaksalternativ A3, heretter omtalt som *middels omfang* (Figur 6-2).

Mengde PFAS i masser i umettet sone (over nivå for årlig høyvann) innenfor tildekket areal for tiltaksalternativ A4 er beregnet til 4,3 kg, noe som tilsvarer om lag 41% av total mengde PFAS i jord på BØF2 (umettet og mettet sone) og BØF1 (mettet sone).

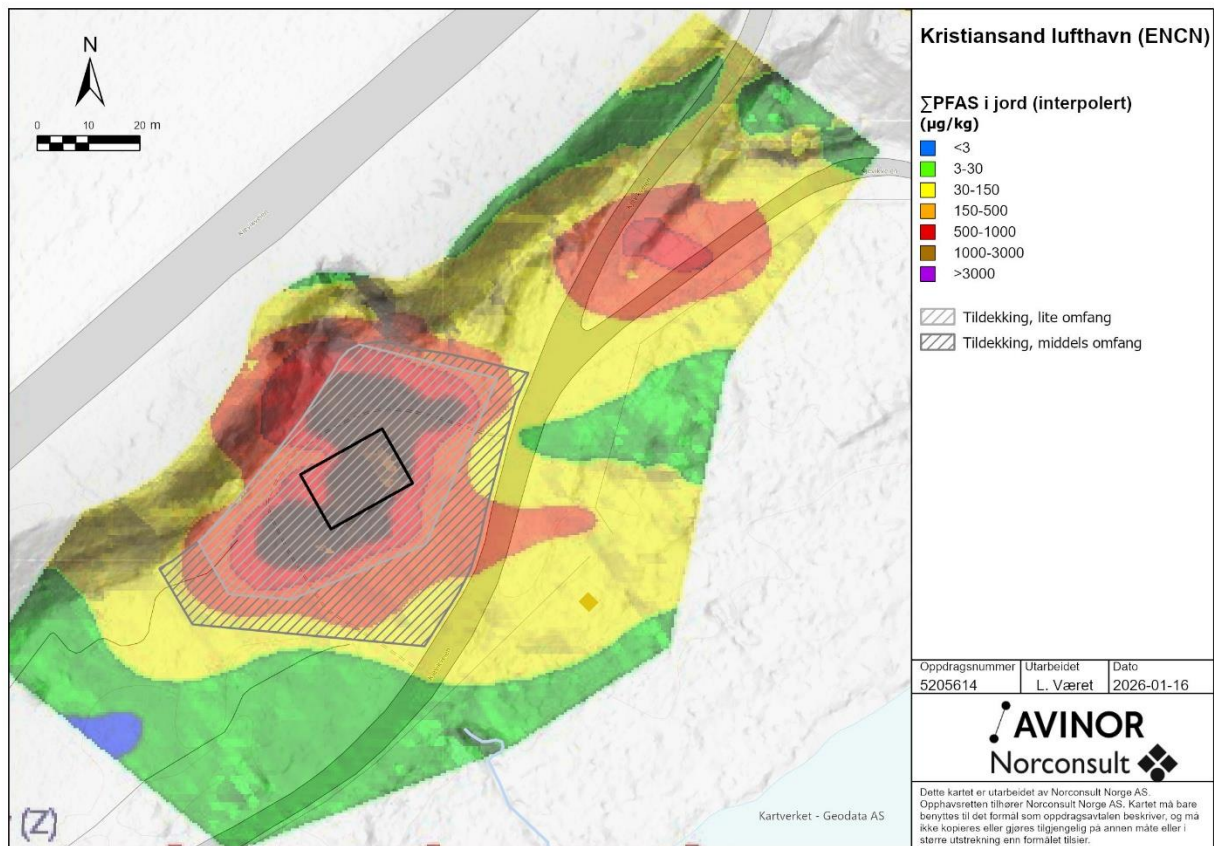
Det er for samlet effekt av et tiltaksalternativ A4 lagt til grunn at årlig spredningsmengde fra BØF2 vil reduseres til 75% av dagens spredningsmengde, dvs. om lag 100 g/år, som følge av tildekking av masser i umettet sone. Videre legges det til grunn 90% rensegrad i vannrenseanlegget for denne spredningsmengden (90 g/år). I tillegg til dette kommer de 4,3 kg PFAS som immobiliseres gjennom tildekking av masser (middels omfang) ved BØF2. Med disse forutsetningene viser utførte beregninger at rensing av grunnvann for tiltaksalternativ A3 vil måtte gå over en periode på nærmere 30 år for å fjerne minst 80% av total mengde PFAS i jord på lokaliteten (Figur 6-3).

Dette betyr at det er lagt til grunn samme årlige spredningsmengde og effekt per år for tiltaksalternativ A3 og A4, selv om disse tiltaksalternativene omfatter ulikt omfang og effekt av tildekking av masser i umettet sone. Med de usikkerheter som ligger i utførte beregninger av spredningsmengder (som omtalt i kap. 5), er det ikke mulig å estimere forskjell i fremtidig spredningsmengde og effekt i form av spredningsreduksjon for disse to tiltaksalternativene.

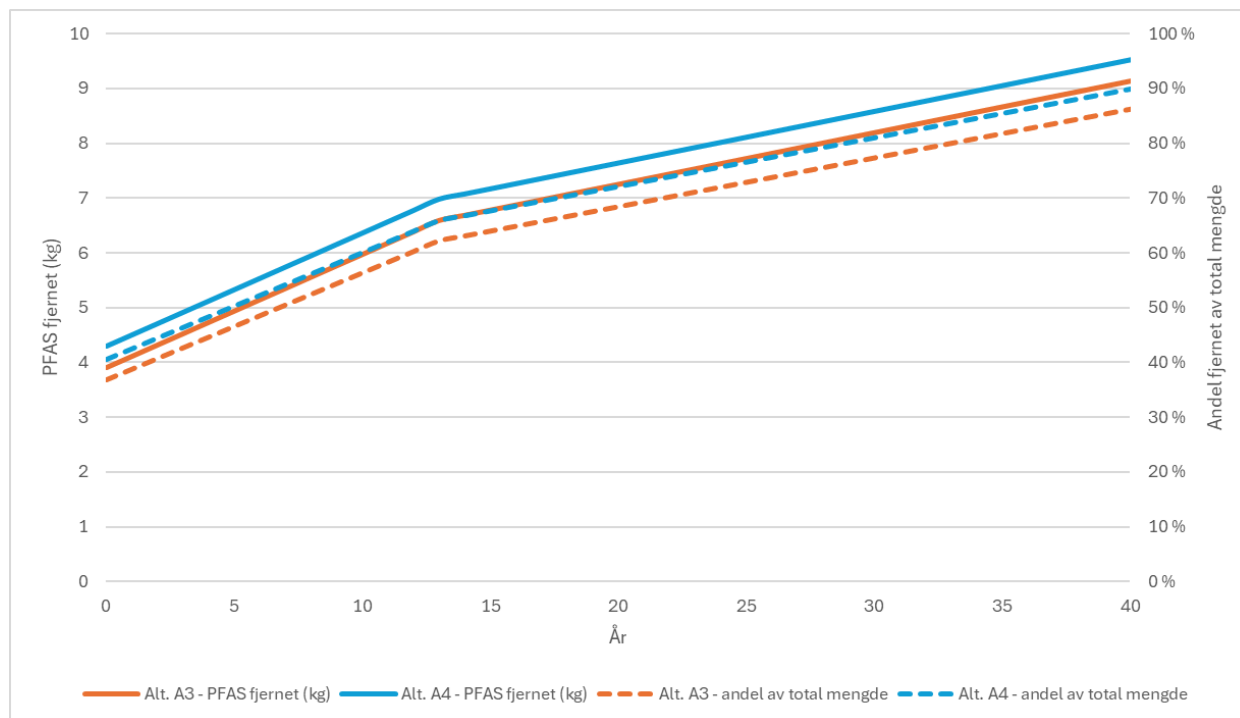
Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04



Figur 6-2: Ulike omfang av tildekking av masser ved BØF2, som grunnlag for beregning av kostnader og tiltakseffekt for tiltaksalternativ A3 og A4.



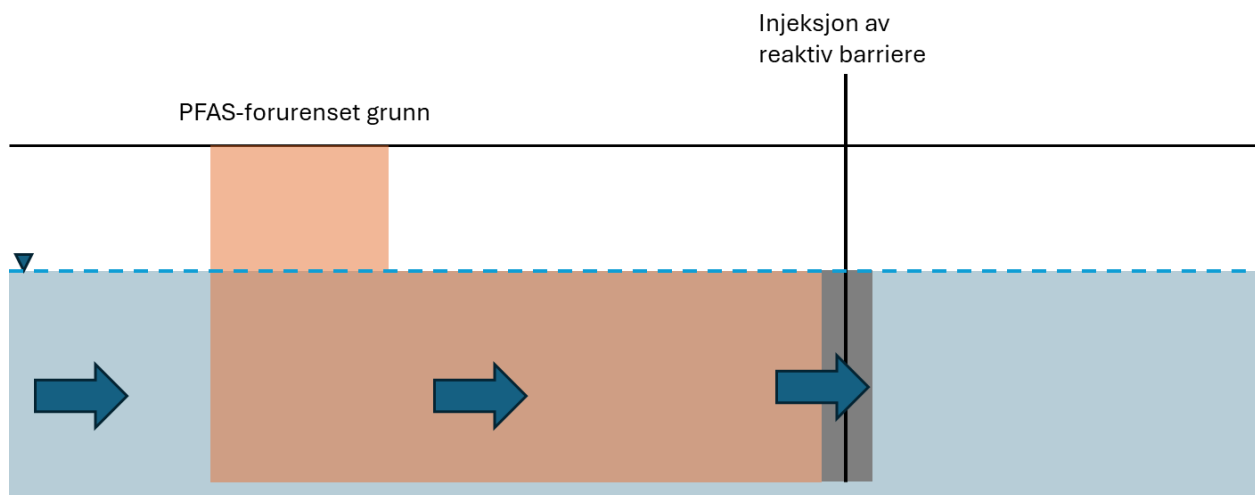
Figur 6-3: Forventet akkumulert effekt (kg PFAS) av et tiltak med rensing av grunnvann ved BØF1 og BØF2 ved ulike varighet av tiltak sammen med andel PFAS fjernet (%) av total mengde i jord (mettet sone BØF1 og umettet/mettet BØF2), for tiltaksalternativer A3 og A4. Det er for begge tiltaksalternativer lagt til grunn tilleggseffekt i form av spredningsreduksjon fra BØF1 for første 13 år (markert med «knekkpunkt» i figur).

6.2 Alternativ B: Reaktiv barriere

Et tiltak med reaktiv barriere omfatter etablering av reaktiv barriere i utstrømningsområde for PFAS-forurensset grunnvann for å redusere spredning av PFAS. En reaktiv barriere etableres nedstrøms forurensset område ved injeksjon av flytende sorbent i kolloidal form ned i kapillærsone og mettet sone (Figur 6-4). En fordel med en slik tiltaksløsning er at den er en «passiv» løsning som krever minimalt med oppfølging og vedlikehold etter etablering, og som vil kunne holde tilbake PFAS som spres via grunnvann uavhengig av hvordan denne spredningen fordeler seg over tid. Dette er en tiltaksløsning som er godt dokumentert med tanke på kortidseffekt, men hvor PFAS ikke fjernes fra lokaliteten, og det derfor fortsatt er betydelige usikkerheter knyttet til effekter over tid.

Etablering av en reaktiv barriere ble i tiltaksplanen vurdert som en mindre aktuell tiltaksmetode, i hovedsak grunnet usikkerheter knyttet til langtidseffekter [3]. Det ble også da oppgitt relativt høye etableringskostnader fra aktuell leverandør av en slik løsning. Det har imidlertid siden gang vært nærmere dialog med aktuell leverandør, noe som har bidratt til å øke kunnskapen om metoden, samtidig som priser oppgitt fra leverandør er lavere sammenliknet med tidligere. Det er imidlertid fortsatt betydelig usikkerhet knyttet til langtidseffekter, da reaktiv barriere som tiltaksmetode er en relativt ny metode, hvor det i praksis ikke foreligger dokumentasjon på effekt over lengre tid (>10 år).

Grunnet usikkerhet knyttet til levetid og langtidseffekt, vurderes løsningen kun som aktuell i kombinasjon med et sekundært tiltak som fjerner en større andel av forurensningen på BØF2. Et slikt kombinasjonstiltak vil bidra til å redusere belastningen på barrieren over tid, noe som både vil redusere behovet for reinjeksjon av sorbent, og samtidig redusere usikkerheten knyttet til langtidseffekt for det samlede tiltaket.



Figur 6-4: Prinsippskisse for reaktiv barriere. Barrieren etableres ved injeksjon av flytende sorbent ned i kapillærsone og mettet sone.

For et tiltak med reaktiv barriere er det vurdert to alternativer:

Alternativ B1: Reaktiv barriere BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Det er for tiltaksalternativ B1 lagt til grunn etablering av reaktiv barriere i utstrømningssonen for grunnvann nedstrøms BØF2 (ikke BØF1), sammen med utgraving av masser i umettet sone med konsentrasjoner av ΣPFAS >500 µg/kg.

Samlet effekt for et slikt tiltaksalternativ vil være tilsvarende summen av mengde PFAS (kg) i masser med konsentrasjon av Σ PFAS >500 µg/kg og mengde PFAS (kg) holdt tilbake (adsorbert) i barrieren gjennom tiltakets varighet.

Mengde PFAS i masser i umettet sone med konsentrasjon av Σ PFAS >500 µg/kg er beregnet til 3,1 kg, noe som tilsvarer om lag 34% av total mengde PFAS i jord på BØF2 (jf. Tabell 3-2). For effekt av barrieren er det lagt til grunn at barrieren etableres på en måte som gjør at man oppnår en 90% reduksjon i årlig spredningsmengde for PFAS gjennom utstrømmende grunnvann. Det er da lagt til grunn en årlig spredningsmengde fra BØF2 tilsvarende 75% av dagens spredningsmengde, dvs. om lag 100 g/år, som følge av utgraving av «hot spot» BØF2. Dette vil da gi en effekt i form av spredningsreduksjon gjennom barrieren på om lag 90 g PFAS/år.

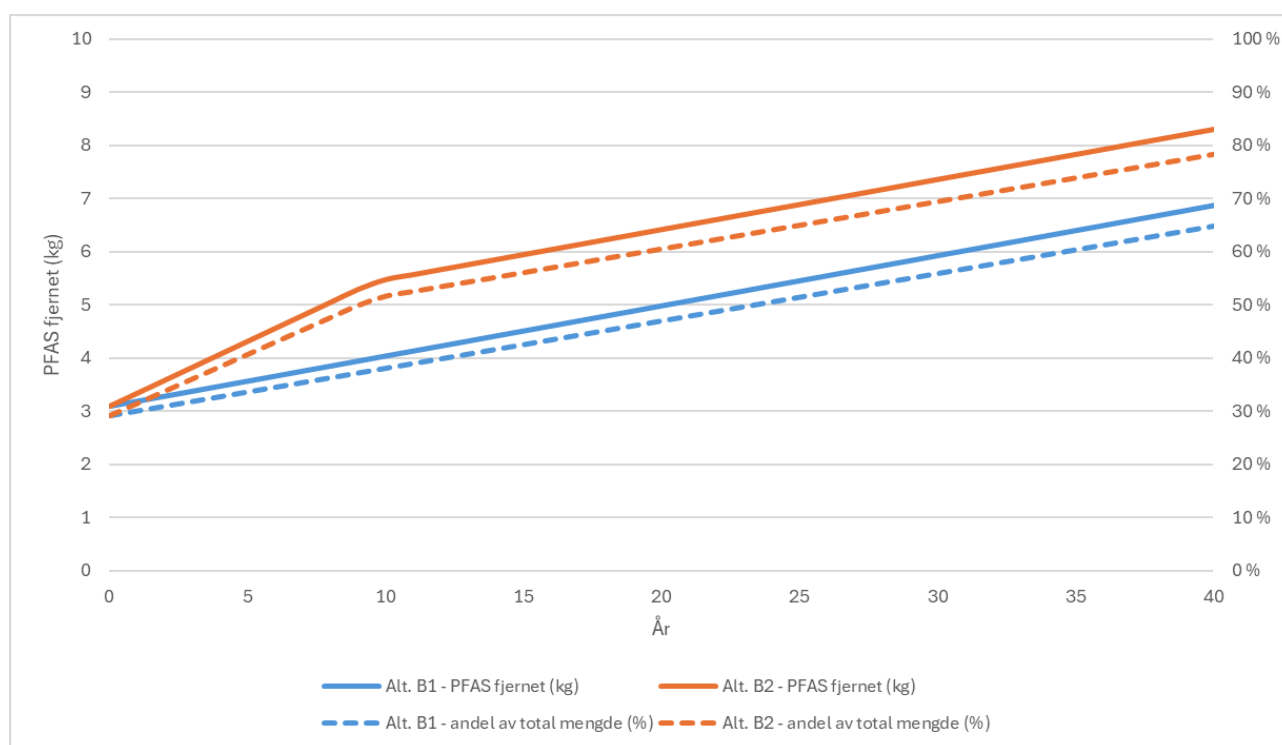
Med disse forutsetningene viser utførte beregninger av forventet effekt for tiltaksalternativ B1 at tiltaket vil måtte gå over en periode mer enn 40 år for å fjerne minst 80% av total mengde PFAS i jord på lokaliteten (Figur 6-5).

Særskilt for dette tiltaksalternativet er at det ikke vil rette seg mot å redusere spredning fra masser i mettet sone på BØF1. Dette betyr at man ved tiltaksalternativ B1 vil ha en fortsatt spredning av PFAS fra mettet sone på BØF1.

Alternativ B2: Reaktiv barriere BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Det er for tiltaksalternativ B2 lagt til grunn etablering av reaktiv barriere i utstrømningssonen for grunnvann nedstrøms både BØF1 og BØF2, sammen med utgraving av masser i umettet sone med konsentrasjoner av Σ PFAS >500 $\mu\text{g/kg}$ (på BØF2).

Samlet effekt for dette tiltaksalternativet vil være tilsvarende effekt for tiltaksalternativ B1, men med en tilleggseffekt som følge av spredningsreduksjon fra BØF1. Med de forutsetninger som er lagt til grunn vil forventet effekt i praksis være tilsvarende forventet effekt for tiltaksalternativ A2, og tiltaket vil da vil måtte gå over en periode på nærmere 40 år for å fjerne minst 80% av total mengde PFAS i jord på lokaliteten (Figur 6-5).



Figur 6-5: Forventet akkumulert effekt (kg PFAS) av et tiltak med reaktiv barriere ved ulike varigheter av tiltak, sammen med andel PFAS fjernet (%) av total mengde i jord (mettet sone BØF1 og umettet/mettet BØF2), for tiltaksalternativer B1 og B2. Det er for tiltaksalternativ B2 lagt til grunn tilleggseffekt i form av spredningsreduksjon fra BØF1 for første 10 år (markert med «knekkpunkt» i figur).

6.3 Alternativ C: Oppgraving med ekstern deponering

Tiltaksalternativ C omfatter oppgraving med ekstern deponering av masser ved BØF2. Dette er da lagt til grunn oppgraving med ekstern deponering som eneste tiltak ved BØF2, og ingen kombinasjon med andre tiltaksløsninger. Et slikt tiltaksalternativ vil da, tilsvarende som tiltaksalternativ B1, heller ikke rette seg mot å redusere spredning fra masser i mettet sone på BØF1.

Det er for tiltaksalternativ C vurdert effekt for oppgraving og ekstern deponering av masser for ulike konsentrasjonsgrenser (>30, >100, >150 og >500 $\mu\text{g/kg}$) i mettet og umettet sone. Effekt i form av mengde PFAS (kg) fjernet vil være tilsvarende beregnet mengde i masser for de ulike konsentrasjonsgrensene, men med en tilleggseffekt som følge av at faktisk utgravd volum vil være noe større enn interpolert volum (Tabell

6-1). Det er for beregninger av effekt lagt til grunn at faktisk utgravd volum vil være om lag 25% større enn interpolert volum, både som følge av hensynet til praktisk utførelse (eks. graveskråninger) og usikkerheter i interpoleringen. Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet (%) av total mengde i jord tatt utgangspunkt i total mengde PFAS i jord ved BØF1 (mettet sone) og BØF2 (umettet og mettet sone). Dette avviker fra tilsvarende beregninger i tidligere utarbeidet tiltaksplan [3], der effekt ble beregnet relativt til total mengde PFAS i jord ved kun BØF2.

Tilsvarende som for tiltaksalternativene som baserer seg på en effekt i form av spredningsreduksjon, vil det også være en betydelig usikkerhet i faktisk effekt for et tiltak som baserer seg på fjerning av mengder i jord. Denne usikkerheten anses allikevel å være betydelig mindre enn usikkerhet i effekt for tiltaksalternativer som baserer seg på en effekt i form av spredningsreduksjon relativt til beregnet spredning under dagens situasjon.

Tabell 6-1: Effekt av tiltak med oppgraving og ekstern deponering av masser for ulike konsentrasjonsgrenser.

Alternativ	Konsentrasjonsgrense Σ PFAS	Volum masser interpolert (m ³)	Volum masser tiltaksomfang* (m ³)	Effekt (kg PFAS)**	Effekt (% PFAS fjernet av total i jord)***
C1	30 µg/kg	29 900	37 400	8,0	75
C2	100 µg/kg	10 700	13 400	6,4	60
C3	150 µg/kg	7500	9 400	5,9	56
C4	500 µg/kg	2150	2700	3,2	30

* Det er en forventning om at volumet masser som omfattes av tiltak vil være større enn det interpolerte volumet masser ved hver konsentrasjonsgrense. Dette som følge av faktisk avgrensning av forurensningen horisontalt og vertikalt, samt hensynet til praktisk utførelse. Det er derfor tillagt 25 % på det interpolerte volumet masser for hver konsentrasjonsgrense.

** Effekt (kg PFAS) for ulike tiltaksomfang ved deponering av masser er noe høyere enn de beregnede mengdene PFAS i interpolert volum masser (kap. 3), da det er tatt høyde for tilleggseffekt i det 25% volumet som er tillagt interpolert volum.

*** Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i total mengde PFAS i jord ved BØF1 (mettet sone) og BØF2 (umettet og mettet sone). Dette avviker fra tilsvarende beregninger i tidligere utarbeidet tiltaksplan [3], der effekt ble beregnet relativt til total mengde PFAS i jord ved kun BØF2. Total beregnet mengde PFAS i jord ved BØF1 (mettet) og BØF2 (umettet/mettet) er 10,6 kg (>3 µg/kg).

6.4 Alternativ D: Tildekking

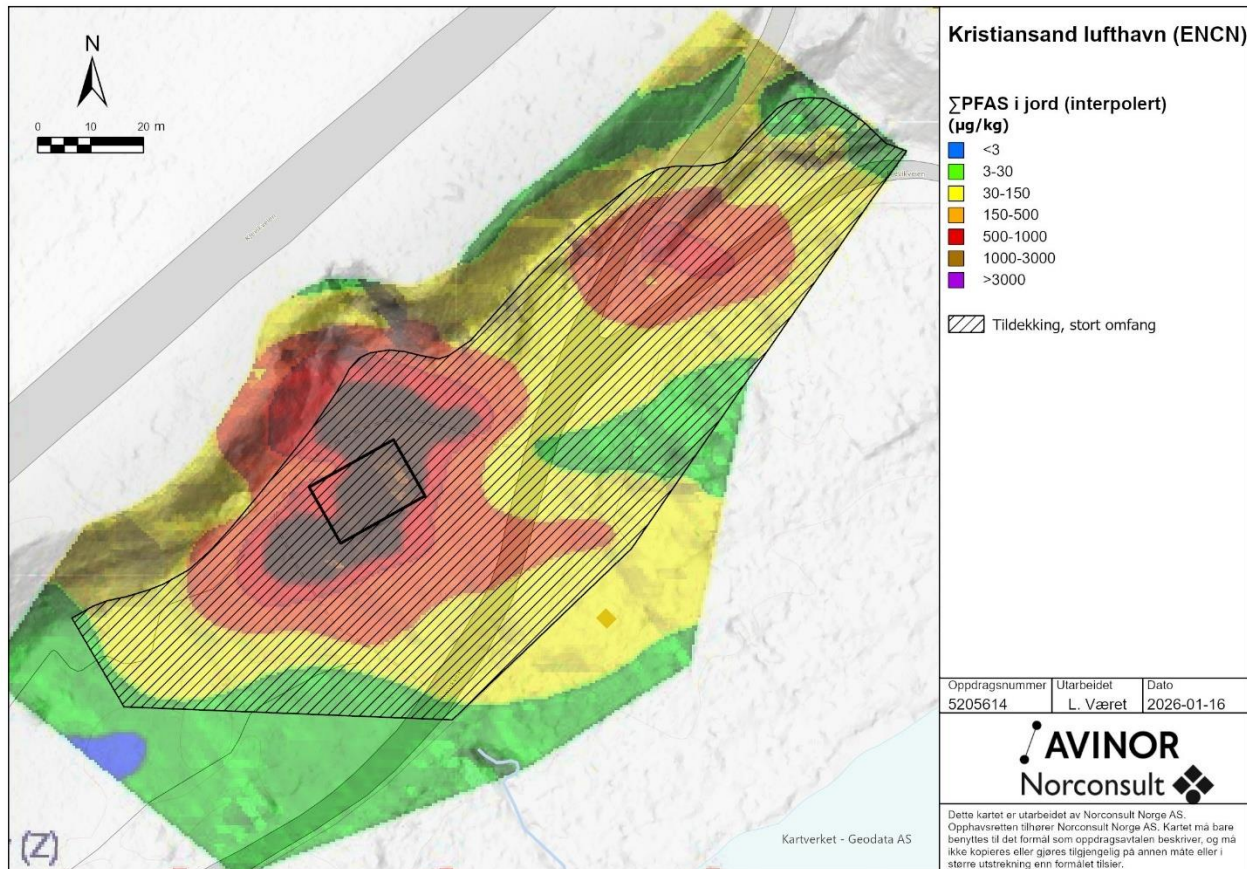
Tiltaksalternativ D omfatter tildekking av masser på BØF2. Det er for dette alternativet lagt til grunn tildekking av masser over et areal på 7500 m², heretter omtalt som *stort omfang* (Figur 6-2). Øvrige forutsetninger for beregning av forventet effekt er tilsvarende som for tildekking beskrevet for tiltaksalternativ A3 og A4.

Mengde PFAS i masser i umettet sone (over nivå for årlig høv vann) innenfor tildekket areal for tiltaksalternativ D er beregnet til 5,5 kg, noe som tilsvarer om lag 50 % av total mengde PFAS i jord på BØF2 (umettet og mettet sone) og BØF1 (mettet sone).

Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04



Figur 6-6: Omfang av tildekking av masser ved BØF2, som grunnlag for beregning av kostnader og tiltakseffekt for tiltaksalternativ D.

7 Kostnader

Det er beregnet kostnader for alle aktuelle tiltaksalternativer som presentert i kap. 6. Hensikten med å beregne kostnader for tiltak er å kunne vurdere kostnader og kost/effekt for ulike tiltaksmetoder og tiltaksomfang, som grunnlag for videre beslutning av tiltaksalternativ for opprydding i forurensning på lokaliteten. Kostnadsberegningene er utført på skissnivå, og det er ikke utført detaljutredninger.

7.1 Metode og forutsetninger

7.1.1 Innhentning av priser

For å estimere mest mulig realistiske kostnader for tiltak er det innhentet priser fra entreprenører, deponier og leverandører av ulike tiltaksløsninger, samt erfaringstall fra Avinor fra tidligere gjennomførte oppryddingstiltak. Avinor har den senere tid gjennomført oppryddingstiltak med oppgraving og ekstern deponering ved flere lokaliteter, samt tildekkingstiltak og rensing av grunnvann ved enkelte lokaliteter, slik at erfaringstallene som da er lagt til grunn antas å være nokså representative for markeds- og konkurransesituasjonen slik den er i dag.

Basert på opplysninger fra ulike aktører er det satt priser som antas å være realistiske, og som kan brukes i en overordnet vurdering av kostnader. En slik innhentning av priser, hvor man ikke er i reell anskaffelse og konkurransesituasjon, vil imidlertid medføre at kostnadene som legges til grunn innehar en betydelig usikkerhet. Prisene vil også speile markedet slik det er i dag, med mulighet for at disse kan endre seg fram mot en fremtidig gjennomføring av tiltak. Alle priser er per 4. kvartal 2025.

7.1.2 Kalkylestruktur

Kostnadsoverslagene for de ulike tiltaksalternativene (basiskalkyle) er bygget opp etter en kalkylestruktur med følgende hovedposter:

- Hovedaktivitet (rensing av grunnvann, etablering av reaktiv barriere, masseutskifting eller tildekking av masser)
- Uspesifisert
- Byggherrekostnader

Uspesifiserte kostnader er inkludert i beregningene (basiskalkyle), da dette omfatter kostnader som er forventet, men som ikke er tilstrekkelig kartlagt eller utredet på grunn av manglende detaljeringsgrad. Denne kostnaden er angitt som et prosentanslag på 12 % for tiltak med oppgraving og ekstern deponering, 15 % på tildekking, 10 % på reaktiv barriere og 20 % for vannrensing. Merverdiavgift (mva) er ikke inkludert i basiskalkylen. Det er ikke utført usikkerhetsanalyse.

7.1.3 Nåverdiberegninger

For å kunne sammenligne kostnadene for de ulike alternativene er det for tiltaksalternativer som innebærer en kostnad framover tid satt opp en nåverdiberegning i tråd med retningslinjene i Rundskriv 109/2021 [8] og Direktoratet for forvaltning og økonomistyring (DFØ) sin veileder i samfunnsøkonomiske analyser [9]. I en samfunnsøkonomisk analyse vil nytte- og kostnadsvirkninger sjelden oppstå på samme tidspunkt. Nåverdimetoden gjør det mulig å sammenligne kostnader som oppstår i ulike år.

Diskonteringsår (nåverdiår) er satt til 2026, diskonteringsrenten er satt til 4 prosent de første 40 årene og 3 prosent mellom år 40-75. Analysene inneholder beregninger for en rekke ulike analyseperioder, men metodikken gir kun grunnlag for å sammenligne alternativ med samme analyseperiode.

Analysen består av investeringskostnader, drifts- og vedlikeholdskostnader og reinvesteringskostnader. Ettersom drifts- og vedlikeholdskostnadene delvis består av lønnskostnader er denne andelen realprisjustert med 0,5 prosent, som er i tråd med retningslinjene i rundskrivet [8], der faktoren er hentet fra siste perspektivmelding [10].

Som følge av at nyttevirkningene kun er fremsatt som virkningsstørrelser (kg PFAS) vil det ikke være grunnlag for å rangere tiltaket etter samfunnsøkonomisk nytte, men beregningene gir fremdeles beslutningstaker verdifull informasjon.

7.2 Beregnede kostnader

Beregnete kostnader og tiltakseffekt for de ulike tiltaksalternativene er presentert i tabeller under.

7.2.1 Alternativ A: Rensing av grunnvann

Alternativ A1: Rensing av grunnvann BØF 1 og BØF2

Tabell 7-1: Beregnet kostnad og tiltakseffekt for tiltaksalternativ A1.

Tiltakets varighet (år)	Basiskostnad (NOK)	Effekt BØF1		Effekt BØF2		Samlet effekt BØF1 og BØF2		Kost/effekt (kr/kg PFAS)
		(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	
10	32 200 000	1,1	69	1,3	14	2,4	23	13 500 000
20	40 500 000	1,5	90	2,5	28	4,0	38	10 150 000
30	48 900 000	1,5	90	3,7	41	5,2	49	9 300 000
40	52 700 000	1,5	90	4,9	54	6,5	61	8 100 000

* Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i beregnet mengde PFAS i jord ved hhv. BØF1 (mettet sone, 1,6 kg) og BØF2 (umettet og mettet sone, 9 kg), og samlet (10,6 kg).

Alternativ A2: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Tabell 7-2: Beregnet kostnad og tiltakseffekt for tiltaksalternativ A2.

Tiltakets varighet (år)	Basiskostnad (NOK)	Effekt BØF1		Effekt BØF2**		Samlet effekt BØF1 og BØF2		Kost/effekt (kr/kg PFAS)
		(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	
10	57 700 000	1,1	69	4,2	47	5,3	50	10 950 000
20	66 000 000	1,5	90	5,1	57	6,6	62	10 050 000
30	74 400 000	1,5	90	6,0	67	7,5	71	9 900 000
40	78 200 000	1,5	90	6,9	77	8,4	80	9 250 000

* Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i beregnet mengde PFAS i jord ved hhv. BØF1 (mettet sone, 1,6 kg) og BØF2 (umettet og mettet sone, 9 kg), og samlet (10,6 kg).

** Effekt (kg PFAS) for ulike tiltaksomfang ved deponering av masser er noe høyere enn de beregnede mengdene PFAS i interpolert volum masser (kap. 5), da det er tatt høyde for tilleggseffekt i det 25% volumet som er tillagt interpolert volum

Alternativ A3: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (lite omfang)

Tabell 7-3: Beregnet kostnad og tiltakseffekt for tiltaksalternativ A3.

Tiltakets varighet (år)	Basiskostnad (NOK)	Effekt BØF1		Effekt BØF2		Samlet effekt BØF1 og BØF2		Kost/effekt (kr/kg PFAS)
		(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	
10	44 000 000	1,1	69	4,9	54	6,0	56	7 350 000
20	52 300 000	1,5	90	5,8	64	7,3	68	7 200 000
30	60 700 000	1,5	90	6,7	74	8,2	77	7 400 000
40	64 500 000	1,5	90	7,6	88	9,1	86	7 050 000

* Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i beregnet mengde PFAS i jord ved hhv. BØF1 (mettet sone, 1,6 kg) og BØF2 (umettet og mettet sone, 9 kg), og samlet (10,6 kg).

Alternativ A4: Rensing av grunnvann BØF og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (middels omfang)

Tabell 7-4: Beregnet kostnad og tiltakseffekt for tiltaksalternativ A4.

Tiltakets varighet (år)	Basiskostnad (NOK)	Effekt BØF1		Effekt BØF2		Samlet effekt BØF1 og BØF2		Kost/effekt (kr/kg PFAS)
		(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	
10	45 700 000	1,1	69	5,3	59	6,4	60	7 150 000
20	54 000 000	1,5	90	6,1	68	7,7	72	7 050 000
30	62 400 000	1,5	90	7,1	79	8,6	81	7 250 000
40	66 200 000	1,5	90	8,0	89	9,5	90	6 950 000

* Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i beregnet mengde PFAS i jord ved hhv. BØF1 (mettet sone, 1,6 kg) og BØF2 (umettet og mettet sone, 9 kg), og samlet (10,6 kg).

7.2.2 Alternativ B: Reaktiv barriere

Alternativ B1: Reaktiv barriere BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Tabell 7-5: Beregnet kostnad og tiltakseffekt for tiltaksalternativ B1.

Tiltakets varighet (år)	Basiskostnad (NOK)	Effekt BØF1		Effekt BØF2**		Samlet effekt BØF1 og BØF2		Kost/effekt (kr/kg PFAS)
		(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	
10	79 100 000	-	-	4,1	46	4,1	39	19 100 000
20	79 100 000	-	-	5,1	57	5,1	48	15 550 000
30	101 700 000	-	-	6,0	67	6,0	57	16 850 000
40	101 700 000	-	-	7,0	78	7,0	66	14 550 000

* Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i beregnet mengde PFAS i jord ved hhv. BØF1 (mettet sone, 1,6 kg) og BØF2 (umettet og mettet sone, 9 kg), og samlet (10,6 kg).

** Effekt (kg PFAS) for ulike tiltaksomfang ved deponering av masser er noe høyere enn de beregnede mengdene PFAS i interpolert volum masser (kap. 5), da det er tatt høyde for tilleggseffekt i det 25% volumet som er tillagt interpolert volum

Alternativ B2: Reaktiv barriere BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2

Tabell 7-6: Beregnet kostnad og tiltakseffekt for tiltaksalternativ B2.

Tiltakets varighet (år)	Basiskostnad (NOK)	Effekt BØF1		Effekt BØF2**		Samlet effekt BØF1 og BØF2		Kost/effekt (kr/kg PFAS)
		(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	
10	105 500 000	1,1	69	4,2	47	5,3	50	20 000 000
20	105 500 000	1,5	90	5,1	57	6,6	62	16 100 000
30	140 700 000	1,5	90	6,0	67	7,5	71	18 750 000
40	140 700 000	1,5	90	6,9	77	8,4	80	16 650 000

* Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i beregnet mengde PFAS i jord ved hhv. BØF1 (mettet sone, 1,6 kg) og BØF2 (umettet og mettet sone, 9 kg), og samlet (10,6 kg).

** Effekt (kg PFAS) for ulike tiltaksomfang ved deponering av masser er noe høyere enn de beregnede mengdene PFAS i interpolert volum masser (kap. 5), da det er tatt høyde for tilleggseffekt i det 25% volumet som er tillagt interpolert volum.

7.2.3 Alternativ C: Oppgraving med ekstern deponering

Tabell 7-7: Beregnet kostnad og tiltakseffekt for tiltaksalternativ C1-C4: Oppgraving med ekstern deponering ved ulike konsentrasjonsgrenser (30, 100, 150 og 500 µg/kg).

Tiltaks- alternativ	Kons.- grense ΣPFAS	Basiskostnad	Effekt BØF1		Effekt BØF2**		Samlet effekt BØF1 og BØF2		Kost/effekt
		(NOK)	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kr/kg PFAS)
C1	30 µg/kg	124 600 000	-	-	8,0	89	8,0	75	15 600 000
C2	100 µg/kg	58 800 000	-	-	6,4	71	6,4	60	9 200 000
C3	150 µg/kg	48 200 000	-	-	5,9	66	5,9	56	8 150 000
C4	500 µg/kg	25 500 000	-	-	3,2	36	3,2	30	8 000 000

* Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i beregnet mengde PFAS i jord ved hhv. BØF1 (mettet sone, 1,6 kg) og BØF2 (umettet og mettet sone, 9 kg), og samlet (10,6 kg).

** Effekt (kg PFAS) for ulike tiltaksomfang ved deponering av masser er noe høyere enn de beregnede mengdene PFAS i interpolert volum masser (kap. 4), da det er tatt høyde for tilleggseffekt i det 25% volumet som er tillagt interpolert volum. Volumer er gitt i Tabell 6-1.

7.2.4 Alternativ D: Tildekking

Tabell 7-8: Beregnet kostnad og tiltakseffekt for tiltaksalternativ D.

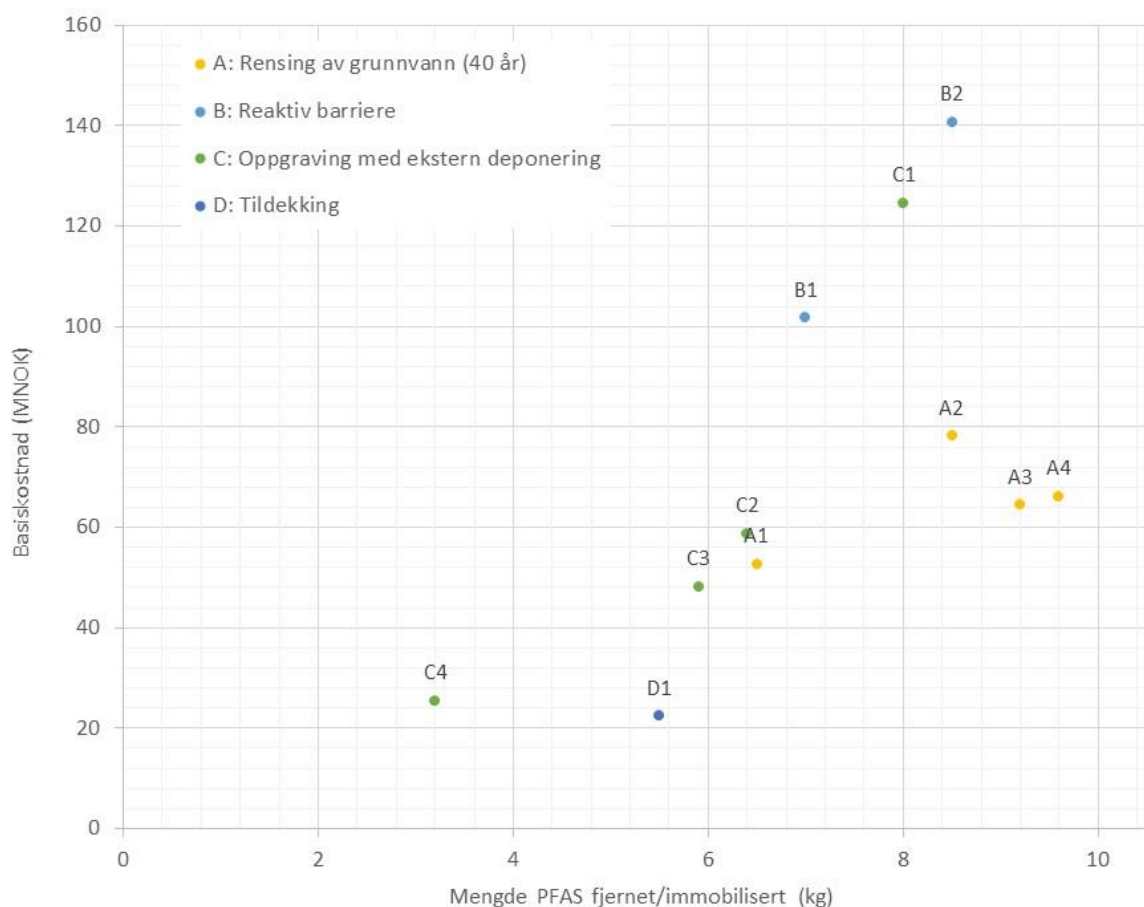
Basiskostnad	Effekt BØF1		Effekt BØF2		Samlet effekt BØF1 og BØF2		Kost/effekt
(NOK)	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kg PFAS)	(%)*	(kr/kg PFAS)
22 400 000	-	-	5,5	61	5,5	52	4 100 000

* Det er for beregning av effekt i form av mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (%) tatt utgangspunkt i beregnet mengde PFAS i jord ved hhv. BØF1 (mettet sone, 1,6 kg) og BØF2 (umettet og mettet sone, 9 kg), og samlet (10,6 kg).

8 Tiltaksanbefaling

En samlet vurdering av kostnader, tiltakseffekt og risiko for vurderte tiltaksalternativer for sist nedlagt brannøvingsfelt (BØF2) er gitt i Vedlegg 1, og konklusjonene oppsummeres kort under.

En sammenstilling av basiskostnad (ikke gjennomgått usikkerhetsanalyse) og tiltakseffekt for de ulike tiltaksalternativene er vist i Figur 8-1.



Figur 8-1: Basiskostnad (MNOK) og tiltakseffekt (kg PFAS) for vurderte tiltaksalternativer.

8.1 Tiltaksalternativer som ikke vurderes videre

Tiltaksalternativene A3 og A4 Rensing av grunnvann i kombinasjon med tildekking, B: Reaktiv barriere og D: Tildekking vurderes som lite aktuelle.

For reaktiv barriere skyldes dette i stor grad kostnaden, men også den betydelige usikkerheten knyttet til effekt og «levetid» for en slik metode. Tildekking har en lav kostnad sammenliknet med andre vurderte alternativer, men har samtidig en forventet lav effekt. Dette skyldes i hovedsak en begrenset mektighet på umettet sone (over grunnvann), hvor tildekkingen ikke vil ha effekt på den andel av forurensningen som ligger i mettet sone (under grunnvann), samt begrenset mulighet for tildekking av bratt skråning mot nordvest.

Topdalselva er tidevannspåvirket, og måleserier viser at grunnvannsnivå samvarierer med vannstand i Topdalselva (Figur 2-3). Middelhøyvann (gjennomsnitt av alle målte høyvannsnivåer gjennom referanseperioden) forventes å øke fra dagens 10 cm til 90 cm i år 2100 og 150 cm i 2150 (Figur 8-2) [11]. Det må således forventes at grunnvannstand også vil øke vesentlig, og at mektighet på umettet sone vil reduseres, som vil medføre avtakende effekt over tid for tiltak med lang levetid (>100 år) rettet mot umettet sone, slik som tildekking. For tiltaksmetoder som retter seg mot mettet sone og forventet kortere varighet enn et tildekkings tiltak (eks. grunnvannsrensing), er ikke scenarier for 2100 og 2150 relevant.



Figur 8-2: Visualisering av nivå for middelhøyvann i dag, 2100 og 2150, hentet fra Kartverkets tjeneste «Se havnivå i kart» [11] viser effekten av økt havnivå for de offisielle nivåene anbefalt i i veilederen «Havnivåstigning og høye vannstander i samfunnsplanlegging» [12] som bygger på kunnskapsgrunnlaget fra «Sea-level Rise and Extremes in Norway» [13].

8.2 Tiltaksalternativer som tas med i videre vurderinger

A2: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hotspot» BØF2 for gjennomføring av opprydningstiltak ved lokaliteten.

Dette er et tiltak som har en relativt høy basiskostnad, men også en høy effekt i form av mengde PFAS fjernet. Det anbefales utgraving av «hotspot» i kombinasjon med rensing av grunnvann, da man gjennom et slikt kombinasjonstiltak vil kunne oppnå en sikrere effekt av tiltaket, samtidig som man mest sannsynlig reduserer nødvendig varighet av vannrensetiltaket, sammenliknet med et vannrensetiltak alene (tiltaksalternativ A1). Dette alternativet vil også omfatte forurensning i mettet sone på BØF1.

Dette er et tiltak som man har tillatelse til gjennom gjeldende pålegg fra Miljødirektoratet.

Tiltaksalternativ C2: Oppgraving og ekstern deponering av masser BØF2 >100 µg/kg.

Dette er et tiltaksalternativ som har en noe lavere basiskostnad, og også noe lavere forventet effekt, sammenliknet med alternativ A2. Tiltaksalternativet vil også innebære en relativt høy gjennliggende mengde PFAS på lokaliteten etter tiltak (60% fjernet gjennom tiltak, 40% gjennliggende av total mengde). Fordeler med et slikt tiltak er imidlertid at man fjerner mye av forurensningen «her og nå», og at man slipper den forpliktelse og de usikkerheter som ligger i oppfølging og effekt av et vannrensetiltak over lang tid.

Tillatelse til gjennomføring av oppgraving og ekstern deponering som eneste tiltak er ikke omfattet av gjeldende pålegg fra Miljødirektoratet. Det vil da være en risiko for at Miljødirektoratet ikke godkjenner tiltak som ikke inkluderer mettet sone BØF1, eller et tiltaksomfang med en forventet effekt som ikke anses tilstrekkelig.

8.3 Videre arbeider

Som nevnt i kap. 3.2 innehar beregnede volumer og mengde PFAS i jord usikkerhet, særlig knyttet til masser i skråningen nordvest for BØF2. Det er i tillegg noe mangelfull avgrensning av forurensning mellom brannøvingsfeltet og Topdalselva (utenfor lufthavngjerdet). Samtlige punkter utenfor lufthavngjerdet har lave konsentrasjoner av Σ PFAS ($<30 \mu\text{g/kg}$), men antall punkter er begrenset og er i relativt lang avstand til nærmeste punkt med høyere konsentrasjoner ($<150 \mu\text{g/kg}$). For å redusere usikkerhet knyttet til volum forurensede masser og mengder PFAS, og dermed usikkerhet knyttet til valg av tiltaksmetode og tiltaksomfang, samt tilhørende kostnad og effekt av tiltaket, anbefales det å utføre supplerende undersøkelser i skråningen.

Det anbefales at undersøkelsene dekker hele jordprofilen fra terreng ned til 2-3 m under grunnvannstand, noe som forutsetter prøvetaking med grunnbøringsutstyr, mest sannsynlig naver. For prøvetaking mellom skråningsfot og Topdalselva antas prøvetakingen å kunne utføres med standard geoteknisk borerigg, mens prøvetaking i selve skråningen mot lufthavnen/rullebanen krever spesialutstyr med lang rekkevidde (f.eks. grunnbøringsutstyr/naver montert direkte på gravemaskin med lang arm).

Det vil bli utarbeidet egen prøvetakingsplan for supplerende undersøkelser, hvor omfang og gjennomføring avklares med Avinor før gjennomføring. Supplerende undersøkelser planlegges gjennomført våren 2026.

I etterkant av påfølgende miljøtekniske grunnundersøkelser må tiltaksavgrensning oppdateres, sammen med oppdaterte mengder PFAS og hvilket volum masser forurensingen er fordelt i. Dette vil danne grunnlag for oppdaterte beregninger av kostnader og tiltakseffekt for tiltaksalternativ A2 og C2, som vil inngå i beslutningsgrunnlag for endelig anbefaling og beslutning knyttet til tiltaksalternativ.

Som følge av behov for supplerende undersøkelser anses det ikke gjennomførbart å overholde frist for å gjennomføre tiltak i 2026 i tråd med Miljødirektoratets pålegg [4].

9 Referanser

- [1] Norconsult, "Tiltaksplan Kristiansand lufthavn, Kjevik," 2015.
- [2] Miljødirektoratet, "Kristiansand lufthavn, Kjevik - Pålegg om utarbeidelse av en tiltaksplan," 2014.
- [3] Norconsult AS, "Tiltaksplan for PFAS-forurensset grunn. Kristiansand lufthavn Kjevik. Nedlagte brannøvingsfelt (BØF1 og BØF2)," 2023.
- [4] Miljødirektoratet, "Pålegg om å gjøre tiltak i PFAS-forurensset grunn ved Kristiansand lufthavn Kjevik i Kristiansand kommune.," 2025.
- [5] Norconsult AS, "Tilleggsvurderinger til tiltaksplan for PFAS-forurensset grunn. Nedlagt brannøvingsfelt (BØF1 og BØF2). Kristiansand lufthavn.," 2025.
- [6] Kartverket, "Se Havnivå," [Online]. Available: <https://www.kartverket.no/til-sjos/se-havniva/resultat?id=935020&location=Kjevik>. [Accessed 18 12 2025].
- [7] V. Skala, "A practical use of radial basis functions interpolation and approximation," University of West Bohemia, 2016.
- [8] Finansdepartementet, "R-109 Prinsipper og krav ved utarbeidelse av samfunnsøkonomiske analyser," 2021.
- [9] DFØ, Veileder i samfunnsøkonomiske analyser, 2023.
- [10] Finansdepartementet, "Perspektivmeldingen 2024," Meld. St. 31 (2023 - 2024), 2024.
- [11] "Se havnivå i kart," Kartverket, [Online]. Available: https://www.kartverket.no/til-sjos/se-havniva/kart?zoom=6¢er=68680,7189212&locationId=&year=2100&layer=stormflo200ar_klimaar2100. [Accessed 19 01 2026].
- [12] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), "Havnivåstigning og høye vannstander i samfunnsplanlegging," 2024.
- [13] M. Simpson, A. Bonaduce, H. Borck, K. Breili, Ø. Breivik, O. Ravndal and K. Richter, "Sea-Level Rise and Extremes in Norway: Observations and Projections Based on IPCC AR6. Norwegian Centre for Climate Services report 1/2024," 2024.

Oppdaterte tilleggsvurderinger

Nedlagt brannøvingsfelt (BØF2), Kristiansand lufthavn

Oppdragsnr.: 5205614 Dokumentnr.: 10005886-188103-CN000-S-RA-0002 Revisjon: FE04

10 Vedlegg

Vedlegg 1 Matrise tiltaksalternativer

Vedlegg 1 Matrise tiltaksalternativer				
Tiltaksalternativ	Alternativ A: Rensing av grunnvann ("pump and treat")	Alternativ B: Reaktiv barriere	Alternativ C: Oppgraving med ekstern deponering	Alternativ D: Tildekking
Beskrivelse av primærtiltak	Innebærer oppsamling av grunnvann med påfølgende rensing i renseanlegg før utslipp til resipient (antatt via reinfiltrasjon eller via eksisterende drengsgrøft med utløp til Topdalselva). Oppsamlingssystem er i tiltaksplanen skissert i form av pumpebrønner fordelt på rekke normalt på grunnvannets strømningsretning nedstrøms BØF1 og BØF2. Renseanlegg plasseres i permanent bygg, og tiltaket innebærer etablering av infrastruktur i grunnen. Dette er en tiltaksløsning som innebærer at PFAS fjernes fra lokaliteten, da i form av den mengde PFAS som bindes i rensemedium (eks. aktivt kull eller ionebytter). Forbrukt rensemedium leveres til godkjent mottak for forburning eller deponering.	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 strømmet gjennom barrieren, og derigjennom holde tilbake forurensning fra å nå resipient. 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. Dette er en tiltaksløsning som vil bidra til å immobilisere PFAS i grunnen, og derigjennom redusere spredningen til resipient, men PFAS fjernes ikke fra lokaliteten.	Innebærer oppgraving av forurensete masser til ulike konsentrasjonsgrenser ("akseptkriterier") med deponering av masser på eksternt godkjent mottak. Et tiltak med oppgraving og ekstern deponering av masser innebærer at PFAS fjernes fra lokaliteten, og at man i prinsippet flytter forurensningen fra lokaliteten til et deponi med kontrollert avrenning og rensing av sigevann (-spredningskontroll-).	Innebærer tildekking av forurensete masser ved etablering av horisontal membran (topptetting) over areal for forurensete masser. Tildekking av masser er en tiltaksløsning som vil ha effekt i form av å redusere infiltrasjon av vann og derigjennom redusere utlekking av PFAS fra masser i umettet sone innenfor tildekket areal. Dette vil da gjelde for masser som ligger i umettet sone over nivå for grunnvann, og som i praksis i svært liten grad forventes å ville komme i kontakt med vann.
	Vurderinger av aktuelle renseløsninger og kostnader for disse er basert på dialog med leverandører og erfaringstall fra gjennomførte tiltak på andre lokaliteter. Rensing av PFAS-holdig vann er en kjent og veletablert tiltaksløsning, som flere leverandører har erfaring med.	Vurderinger av reaktiv barriere som tiltaksmetode og kostnader for denne er basert på dialog og priser mottatt fra Regensis, 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.	Oppgraving med ekstern deponering av masser er en tiltaksmetode som Avinor har mye erfaring med gjennom tiltak utført på andre lokaliteter/lufthavner. Kostnadsberegninger er for dette tiltaksalternativet i stor grad basert på erfaringstall fra gjennomførte tiltak på andre lokaliteter.	Oppgraving med tildekking av masser i umettet sone er en tiltaksmetode som Avinor har noe erfaring med gjennom tiltak utført på annen lokalitet/lufthavn (Kirkenes). Kostnadsberegninger for tildekking er i stor grad basert på erfaringstall herfra.
	Effekt av et tiltak med rensing av grunnvann er oppad begrenset til samlet spredningsmengde. Med en relativt lav beregnet årlig spredningsmengde fra de to brannøvsfeltene (310 g/år), vil dette også innebære at potensiell effekt av et tiltak med rensing av grunnvann i form av mengde PFAS hentet ut gjennom rensing, vil være begrenset. Gitt betydelige usikkerheter i beregning av spredningsmengder, vil det også være tilsvarende usikkerhet i effekt for et tiltak med rensing av grunnvann. Dette knytter seg også til betydelige usikkerheter i hvordan spredningen vil utvikle seg over tid.	Grunnet usikkerhet knyttet til levetid og langtidseffekt, vurderes løsningen kun som aktuell i kombinasjon med et sekundærtiltak som fjerner en større andel av forurensningen på BØF2. Et slikt kombinasjonstiltak vil bidra til å redusere belastningen på barrieren over tid, noe som både vil redusere behovet for reinjeksjon av sorbent, og samtidig redusere usikkerheten knyttet til langtidseffekt for det samlede tiltaket.	Oppgraving med ekstern deponering av masser er en tiltaksmetode som har mindre usikkerhet knyttet til effekt sammenliknet med andre vurderte tiltaksmetoder. Dette skyldes i hovedsak at man gjennom en slik tiltaksmetode fjerner forurensningen "her og nå", hvor effekt baserer seg på beregning av forventet mengde PFAS i det volumet masser som fjernes. Selv om en slik beregning innehar sine usikkerheter, vurderes denne usikkerheten allikevel å være betydelig mindre enn usikkerhet i effekt for tiltaksalternativer som baserer seg på en effekt i form av spredningsreduksjon.	Tildekking som eneste tiltak er en tiltaksmetode som ikke vil ha effekt på PFAS i mettet sone (under grunnvannsnivå), og som ikke fjerner PFAS fra lokaliteten. For uten å variere med årstidene vil grunnvannsnivå på BØF2 også variere med nivåer i Topdalselva, som igjen påvirkes av tidevann i Topdalsfjorden. Forventet effekt for et tildekkingstiltak er estimert med utgangspunkt i forventet grunnvannstand tilsvarende årlig høyvann i Topdalselva/Topdalsfjorden. Innenfor forventet levetid for tiltaket (>100 år) forventes imidlertid fremtidig klimaendringer og havnivåøkning å påvirke grunnvannsnivå ved BØF2, noe som forventes å gi en redusert mektighet for umettet sone, og følgelig avtakende effekt for et tiltak med tildekking over tid.
	Det er vurdert tiltaksalternativer med rensing av grunnvann som eneste tiltak (A1), og i kombinasjon med andre tiltaksmetoder (A2-A4). Disse andre tiltaksmetodene er beskrevet under hhv. Alt. C og D.	En tiltaksløsning med reaktiv barriere vil kreve gjennomføring av pilot i forkant (6 mnd - 1 år) som grunnlag for å bestemme endelig utforming av barriere.		
	Det er vurdert tiltaksalternativer med reaktiv barriere i kombinasjon med utgraving av "hot spot" BØF2. Oppgraving og ekstern deponering som tiltaksmetode er beskrevet under Alt. C.			
Tiltakskombinasjoner	A1: Rensing av grunnvann BØF 1 og BØF2 A2: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2 A3: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (lite omfang) A4: Rensing av grunnvann BØF1 og BØF2, i kombinasjon med tildekking BØF2 (middels omfang)	B1: Reaktiv barriere BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2 B2: Reaktiv barriere BØF1 og BØF2, i kombinasjon med utgraving av «hot spot» BØF2	C1: Oppgraving og ekstern deponering av masser BØF2 >30 µg/kg C2: Oppgraving og ekstern deponering av masser BØF2 >100 µg/kg C3: Oppgraving og ekstern deponering av masser BØF2 >150 µg/kg C4: Oppgraving og ekstern deponering av masser BØF2 >500 µg/kg	D1: Tildekking av masser BØF2 (stort omfang)
Tiltaket inkluderer BØF1 (mettet sone)* <i>* Forurensning i mettet sone som ikke vil omfattes av planlagt tildekkingstiltak på BØF1</i>	Ja, for alle vurderte alternativer.	Ja, for alternativ B1.	Nei	Nei
Basiskostnad (NOK)* <i>* Det er ikke gjennomført usikkerhetsanalyse for noen av alternativene. Kostnadsestimater inkluderer ikke påslag for usikkerhet</i>	A1: NOK 52 700 000 (40 år) A2: NOK 78 200 000 (40 år) A3: NOK 64 500 000 (40 år) A4: NOK 66 200 000 (40 år)	B1: NOK 101 700 000 (40 år) B2: NOK 140 700 000 (40 år)	C1: NOK 124 600 000 C2: NOK 58 800 000 C3: NOK 48 200 000 C4: NOK 25 500 000	D1: NOK 22 400 000
Effekt (kg PFAS fjernet/immobilisert)	A1: 6,5 kg (40 år) A2: 8,4 kg (40 år) A3: 9,1 kg (40 år) A4: 9,5 kg (40 år)	B1: 7,0 kg (40 år) B2: 8,4 kg (40 år)	C1: 8,0 kg C2: 6,4 kg C3: 5,9 kg C4: 3,2 kg	D1: 5,5 kg
Effekt (%)* <i>* Mengde PFAS fjernet av total mengde i jord (umettet/mettet sone BØF2 + mettet sone BØF1 = 10,6 kg)</i>	A1: 61% (40 år) A2: 80% (40 år) A3: 86% (40 år) A4: 90% (40 år)	B1: 66% (40 år) B2: 80% (40 år)	C1: 75% C2: 60% C3: 56% C4: 30%	D1: 52%
Risikomomenter				
Risiko 1: Effekt av tiltaket er lavere enn forventet	Middels risiko: Mengde PFAS hentet ut gjennom renseanlegget over tid kan være lavere enn det som er lagt til grunn i beregningene, og vil ha innvirkning på varigheten av tiltaket. Dette knytter seg særlig til usikkerhet i hvordan spredning vil utvikle seg over tid.	Middels risiko: Mengde PFAS oppkonsentrert i barrieren over tid kan være lavere enn det som er lagt til grunn i beregningene. Dette knytter seg særlig til usikkerhet i hvordan spredning vil utvikle seg over tid.	Lav risiko: Forventet effekt tar utgangspunkt i beregnede mengder i jord. Effekt (mengde PFAS fjernet) inntreffer i år 0, og avhenger ikke av usikkerhet i spredningsforløp fremover i tid. Forventet effekt avhenger av valgt tiltaksomfang.	Middels risiko: Stor usikkerhet knyttet til effekt i et tidsperspektiv som inkluderer fremtidige klima-/havnivåendringer og effekt av tiltaket over tid.
Risiko 2: Gjenværende forurensning	Lav til middels risiko: Så lenge tiltak med rensing av grunnvann opprettholdes vil forurensning i grunnvann (mettet sone) fjernes fra lokaliteten.	Høy risiko: Fjerner ikke forurensningen fra lokaliteten. Usikkert hva som skjer over tid, og i hvilken grad forbindelsene over tid vil løkke ut igjen.	Lav til middels risiko: Tiltaksmetoden fjerner PFAS fra lokaliteten. Mengde gjenværende forurensning avhenger av valgt tiltaksomfang. Omfatter ikke forurensning i mettet sone på BØF1.	Middels risiko: Tiltaksmetoden fjerner ikke PFAS fra lokaliteten, og berører ikke mettet sone. Omfatter ikke forurensning i mettet sone på BØF1.
Risiko 3: Manglende tillatelse fra myndighet	Lav risiko: Tillatelse gjennom gjeldende pålegg	Høy risiko: Tillatelse til etablering av reaktiv barriere er ikke omfattet av gjeldende pålegg fra Miljødirektoratet. Det er usikkert om Miljødirektoratet vil gi aksept og/eller om det vil komme krav om å fjerne barrieren med påfølgende ekstern deponering framover i tid.	Middels risiko: Tillatelse til gjennomføring av oppgraving og ekstern deponering som eneste tiltak er ikke omfattet av gjeldende pålegg fra Miljødirektoratet. Det vil være en risiko for at Miljødirektoratet ikke godkjenner tiltak som ikke inkluderer mettet sone BØF1, eller et tiltaksomfang med en forventet effekt som ikke anses tilstrekkelig.	Høy risiko: Tillatelse til gjennomføring av tildekking som tiltak på BØF2 er ikke omfattet av gjeldende pålegg fra Miljødirektoratet. Det er en risiko for at Miljødirektoratet ikke godkjenner tiltak som ikke inkluderer mettet sone, som i tillegg har relativt lav effekt, samt innehar betydelig usikkerhet knyttet til fremtidig klima-/havnivåendringer.
Risiko 4: 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.	Lav risiko: Antatt flere aktuelle leverandører gir forventet reell konkurranse.	Lav risiko: Antatt flere aktuelle leverandører gir forventet reell konkurranse.
Risiko 5: Langvarig behov for drift og vedlikehold	Høy risiko: Tiltaksmetoden gir en langvarig forpliktelse gjennom behov for kontinuerlig drift og vedlikehold i hele tiltakets levetid.	Middels risiko: Tiltaksmetoden gir ikke behov for oppfølging utover løpende overvåkning , men det forventes behov for reinjeksjon ca. hvert 20-25 år i hele tiltakets levetid.	Lav risiko: Tiltaksmetoden gir ikke behov for oppfølging utover løpende overvåkning.	Lav risiko: Tiltaksmetoden gir ikke behov for oppfølging utover løpende overvåkning.
Risiko 6: Kostnader for tiltaket er høyere enn forventet	Middels risiko: Faktiske kostnader gjennom tiltakets varighet (40 år) kan bli høyere enn lagt til grunn.	Middels risiko: Kun mottatt budsjettpris fra en leverandør. Få aktører i markedet. Hyppigere behov for reinjeksjon enn det som er lagt til grunn.	Lav risiko: Avinor sitter på betydelige erfaringstall fra tilsvarende tiltak gjennomført på andre lokaliteter.	Lav risiko: Avinor har erfaringstall fra tilsvarende tiltak gjennomført på annen lokalitet.