

Hydrodynamisk modellering av Oslofjorden

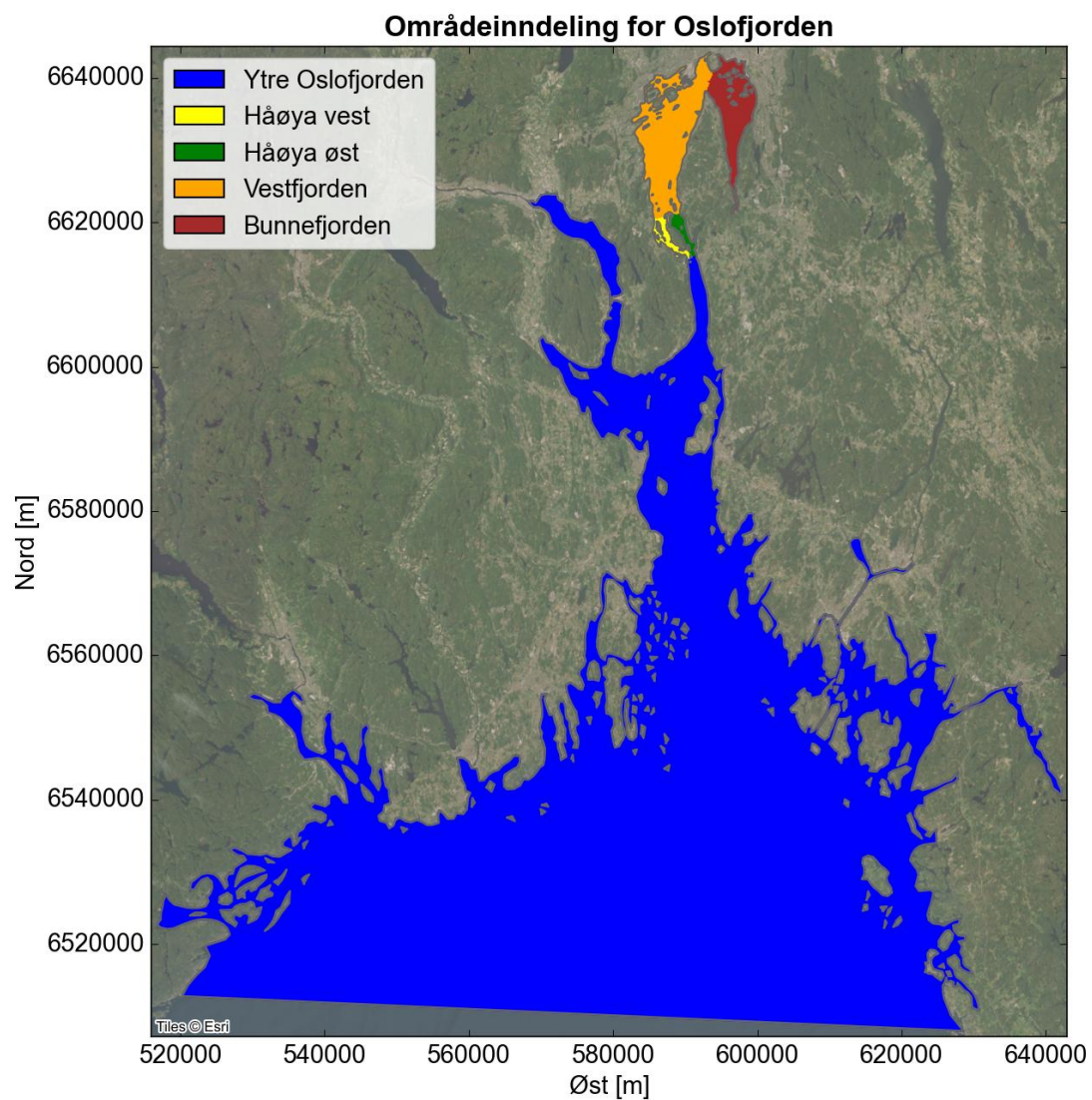
Sporstoffmodellering av dypvannsinnbrudd og
vannutskiftning i indre Oslofjord

Rapport

Prosjektnummer: 13801627-04

11.06.26

Laget for Multiconsult



Hydrodynamisk modellering av Oslofjorden

Rapport

Prosjektnummer: 13801627-04

Utarbeidet for: Multiconsult

Representert ved Martin Arntsen

Sluttkunde: Kystverket

Representert ved Henrik Kristoffersen, Benedikte Farstad Nashoug og Frode Seiersnes

Kontaktperson Multiconsult:	Martin Arntsen, martia@multiconsult.no , 917 35 601
Kontaktperson Kystverket:	Henrik Kristoffersen, Henrik.Kristoffersen@kystverket.no , 994 32 188
Prosjektleder:	Mathias Singaas Frøseth, msfr@dhigroup.com , 472 91 569
Kvalitetsansvarlig:	Ole Svenstrup Petersen
Forfatter:	Mathias Singaas Frøseth, msfr@dhigroup.com , 472 91 569
Prosjektnummer:	13801627-04
Godkjent av:	Charlotta Lövestedt
Godkjenningsdato:	11.06.26
Revisjon:	1.2
Filnavn:	Rapport_Sporstoffmodellering_Oslofjorden.docx

Innholdsfortegnelse

Ordliste og symboler	1
Sammendrag	7
1 Introduksjon	10
2 Hydrodynamisk modell av Oslofjorden	13
2.1 Oppsummering av funn og tolkning	13
2.2 Scenarioer	13
2.3 Hovedfunn	13
2.4 Scenario 1	13
2.5 Scenario 2	14
2.6 Dypvannsinnebrudd	14
2.7 Potensiell energianomali	14
3 Metode	15
3.1 Oppsett av sporstoffmodell	15
3.2 Valg av perioder	17
3.3 Dypvannsinnebrudd	21
3.4 Boksviss utskiftningstid (τ)	22
3.5 Vertikalblanding	23
3.5.1 Vertikal turbulent diffusivitet K_z	23
3.5.2 Richardson-tallet	25
4 Resultater	26
4.1 Dypvannsinnebrudd	26
4.2 Boksviss utskiftningstid (τ)	32
4.3 Vertikalblanding	34
4.3.1 Vertikal turbulent diffusivitet K_z	34
4.3.2 Richardson-tallet	36
5 Diskusjon	38
5.1 Transportveier	40
5.2 Dypvannsinnebrudd	41
5.3 Boksviss utskiftningstid	42
5.4 Vertikal blanding	42
5.5 Boksinnndeling og lagdeling	44
6 Konklusjon	46
7 Referanser	48

Vedlegg

Vedlegg A Figurer

Vedlegg A.1	Massen av komponenten Ytre Oslofjorden Bot i de forskjellige boksene
Vedlegg A.2	Tidsserier for boksviss utskiftningstid i stagnasjonsperiodene
Vedlegg A.3	Tidsserier for differansene av både akkumulert volumtransport og volumtransport per tidssteg

Ordliste og symboler

Fagbegreper

Baseline

Dagens situasjon i modellen, brukt som referanse for å vurdere effekten av Scenario 1 og Scenario 2.

Scenario 1

Tiltaksscenario med en relativt grunn åpning i jetéen, ned til 10,4 m dyp og omtrent 140 m bredde.

Scenario 2

Tiltaksscenario med en dypere åpning i jetéen, ned til 24 m dyp og omtrent 150 m bredde.

Sporstoff

En passiv og konservativ markør som følger vannmassenes bevegelse og blanding i modellen. Sporstoffet påvirker ikke strømfeltet, men brukes til å følge hvor vannmassene kommer fra og hvordan de fordeles over tid.

Sporstoffmodell

En frikoblet transportmodell som bruker strøm- og blandingsfelt fra den hydrodynamiske modellen som drivfelt. I denne rapporten brukes sporstoffmodellen til å undersøke vannmassenes opprinnelse, fortynning, utskifting og vertikal utveksling.

Ytre vannmasser

Vannmasser som i analysen representeres av de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak. Disse brukes som mål på innslag av vann utenfra i Vestfjorden og Bunnefjorden.

Dypvannsinnsbrudd

En periode der saltere og tyngre vann trenger inn i fjorden og påvirker de dypere lagene. I sporstoffanalysen identifiseres dypvannsinnsbrudd som økt andel ytre vannmasser i de dypere lagene.

Stagnasjonsperiode

En periode der stagnasjon er den dominerende tilstanden i dypvannet, og der det ikke forekommer tydelige større dypvannsinnsbrudd. Periodene er ikke fullstendig stagnante, fordi det kan forekomme mindre innslag av saltere vann og omfordeling av vannmasser.

Boks

Et geografisk område og modellert dybdelag brukt som analyseenhet for sporstoffresultatene. En boks består av mange modellceller, og de boksvise verdiene representerer derfor middelerverdi over alle modellcellene innenfor boksen. Boksene er et analysegrep, ikke en reduksjon av den hydrodynamiske modellen til en boksmodell.

Boksinndeling

Inndeling av Oslofjorden i fem geografiske delområder og fire modellerte vertikale lag. Inndelingen er etablert spesielt for denne utredningen for å kunne følge hvordan vannmasser fordeles mellom områder og dybdelag, og for å sammenligne Baseline og scenarioene på en konsistent måte. Den vertikale inndelingen er derfor et analysegrep i denne rapporten, og ikke en generell eller vedtatt standardinndeling av Oslofjorden.

Boksvis utskiftningsstid

Et sporstoffbasert mål på hvor raskt vannet i en definert boks fortynnes og erstattes gjennom utveksling med andre bokser. Verdien beregnes som et gjennomsnitt for alle modellcellene i boksen, og det kan derfor være variasjoner innenfor boksen som ikke fremgår direkte av den boksvise verdien. Kortere boksvis utskiftningsstid betyr raskere fortynning og utskifting av vannet i den aktuelle boksen.

Fortynning

Reduksjon i konsentrasjonen av en sporstoffkomponent i den boksen der den opprinnelig ble initialisert. Fortynningen viser hvordan vann fra andre bokser blandes inn over tid. I denne rapporten omtales fortynning som en boksmidlet størrelse, det vil si som et gjennomsnitt over alle modellcellene innenfor den aktuelle boksen.

Vertikal blanding

Utteksling av vann eller egenskaper mellom ulike dybdelag. I denne rapporten vurderes vertikal blanding blant annet gjennom beregnet vertikal turbulent diffusivitet og Richardson-tallet.

Vertikal utveksling

Transport og blanding mellom vertikale lag. Begrepet brukes i rapporten som en mer generell beskrivelse av hvor effektivt vannmasser og egenskaper utveksles mellom lag.

Vertikal turbulent diffusivitet

Et mål på hvor effektivt turbulens bidrar til å blande egenskaper mellom vertikale lag. I rapporten brukes vertikal turbulent diffusivitet som et diagnostisk mål på beregnet vertikal utveksling.

Turbulens

Uregelmessige og småskala bevegelser i vannmassene som bidrar til blanding av egenskaper som salt, temperatur og sporstoff. I denne rapporten er turbulens relevant fordi den påvirker hvor effektivt vann utveksles mellom vertikale lag.

Richardson-tallet

Et dimensjonsløst mål på forholdet mellom stabiliserende tetthetslagdeling og destabiliserende hastighetsskjær. Høyt Richardson-tall betyr mer stabil lagdeling og mindre gunstige forhold for skjærindusert turbulens, mens lavt Richardson-tall betyr mindre stabilitet og mer gunstige forhold for vertikal blanding.

Stabilitet

Et uttrykk for hvor motstandsdyktig vannsøylen er mot vertikal blanding. Sterk tetthetslagdeling gir høy stabilitet, mens svakere lagdeling eller sterkere skjær gir lavere stabilitet.

Skjær

Vertikal hastighetsgradient mellom lag, altså forskjeller i horisontal strømhastighet med dyp. Skjær kan bidra til å generere turbulens og dermed vertikal blanding.

Tetthetslagdeling

Vertikal fordeling av tetthet i vannsøylen. Ferskere og lettere vann ligger vanligvis over saltere og tyngre vann, og dette motvirker vertikal blanding. Motstanden mot blanding er særlig sterk når tetthetsgradienten er stor eller skarp, det vil si når tettheten endres mye over kort vertikal avstand.

Brunt-Väisälä-frekvens

Et mål på styrken i den stabile tetthetslagdelingen. I rapporten brukes frekvensen i kvadrat, N^2 , som del av beregningen av Richardson-tallet.

Grenseflate

Overgangen mellom to bokser, for eksempel Top–Umid, Umid–Lmid eller Lmid–Bot. Vertikal utveksling og stabilitet beregnes for disse grenseflatene.

Top

Øverste vertikale lag i boksinndelingen, fra 0 til 26 m.

Umid

Øvre mellomlag i boksinndelingen, fra 26 til 75 m.

Lmid

Nedre mellomlag i boksinndelingen, fra 75 til 103 m.

Bot

Bunnlag i boksinndelingen, dypere enn 103 m.

Dypere lag

Samlebetegnelse for de nedre delene av vannsøylen, særlig Lmid og Bot, men også Umid der dette er relevant for dypvannsinnbrudd.

Indre bassenger

Vestfjorden og Bunnefjorden, brukt som hovedområder for vurdering av hvordan endringer i terskelområdet forplanter seg videre inn i fjordsystemet.

Terskelområdet

Området rundt Drøbaksundet, Drøbakerskelen, jetéen og Håøya. Dette er området der tiltaket virker direkte og der transportveiene i størst grad omfordeles.

Jetéåpning

Den nye åpningen i jetéen som inngår i Scenario 1 og Scenario 2. Åpningen gir vannmassene en alternativ transportvei gjennom terskelområdet.

Netto volumtransport

Forskjellen mellom innstrømning og utstrømning over et snitt. Netto volumtransport kan være tilnærmet null selv om både inn- og utstrømning hver for seg er stor.

Positiv akkumulert volumtransport

Akkumulert transport i positiv retning over et definert snitt. I rapporten brukes dette blant annet for å beskrive vann som går inn gjennom Drøbaksundet.

Negativ akkumulert volumtransport

Akkumulert transport i negativ retning over et definert snitt. I rapporten brukes dette blant annet for å beskrive vann som går ut av Drøbaksundet.

Salttransport

Transport av salt over et snitt. Salttransport påvirkes både av volumtransport og salinitet, og kan gi informasjon om hvordan saltere vannmasser fordeles i systemet.

Potensiell energianomali

Et mål på energien som kreves for å blande vannsøylen fullstendig. I rapporten brukes potensiell energianomali som en indikator på stabilitet og lagdeling i den hydrodynamiske analysen.

Numerisk diffusjon

Kunstig blanding som kan oppstå som følge av den numeriske løsningen i en modell. Numerisk diffusjon kan påvirke beregnet vertikal blanding, særlig i lagdelte systemer.

E-folding

En metode for å beskrive hvor raskt en størrelse avtar, ofte definert som tiden det tar før verdien er redusert til 1/e av startverdien. Begrepet kan brukes i forbindelse med oppholdstid eller fortykning, men er ikke hovedmetoden for boksvis utskiftningstid i rapporten.

Munk–Anderson-relasjonen

En empirisk relasjon som beskriver hvordan turbulent diffusivitet kan avta når stabiliteten i vannsøylen øker. I rapporten brukes relasjonen som en teoretisk referanse for å tolke sammenhengen mellom K_z og Richardson-tallet, ikke som selve beregningsmetoden for K_z .

Symboler og størrelser

τ

Boksvis utskiftningstid. Beregnes som arealet under kurven for gjenværende sporstoffandel i en boks over analyseperioden. Enheten er døgn.

K_z

Vertikal turbulent diffusivitet. Brukes som mål på beregnet vertikal utveksling mellom lag. Enheten er m^2/s .

Ri

Richardson-tallet. Dimensjonsløst mål på forholdet mellom stabiliserende tetthetslagdeling og destabiliserende hastighetsskjær.

N^2

Brunt–Väisälä-frekvensen i kvadrat. Beskriver styrken på den stabile tetthetslagdelingen i vannsøylen. Enheten er s^{-2} .

S^2

Kvadrert vertikal hastighetsgradient. Brukes som mål på skjærenergi tilgjengelig for turbulensproduksjon. Enheten er s^{-2} .

$C_i(t)$

Prosentvis andel av sporstoffkomponent i ved tidspunkt t . Brukes til å beskrive hvor stor del av innholdet i en boks som kan knyttes til en bestemt sporstoffkilde. Størrelsen uttrykkes i prosent (%), og er dermed uavhengig av den absolute enheten for sporstoffmasse.

$M_i(t)$

Sporstoffmasse av komponent i ved tidspunkt t . I denne rapporten brukes $M_i(t)$ først og fremst relativt, for å beregne prosentvis andel av ulike sporstoffkomponenter i en boks.

$\sum_j M_j(t)$

Total sporstoffmasse i boksen ved tidspunkt t , summert over alle sporstoffkomponenter j .

$M(t)$

Sporstoffmassen i en boks ved tidspunkt t .

$M(0)$

Sporstoffmassen i boksen ved starttidspunktet.

$f(t)$

Gjenværende fraksjon av sporstoff i boksen ved tidspunkt t , definert som $M(t)/M(0)$. Brukes i beregningen av boksvise utskiftningstid.

t

Tidspunkt i analyseperioden. Enheten avhenger av sammenhengen: i tidsserier og presentasjon av boksvise utskiftningstid brukes døgn, mens enkelte beregninger kan bruke sekunder.

t_0

Starttidspunkt for analyseperioden.

t_{end}

Sluttidspunkt for analyseperioden.

t_i

Et vilkårlig tidspunkt i tidsserien som brukes i den numeriske beregningen av boksvise utskiftningstid.

Δt_i

Tidsintervallet mellom to påfølgende tidspunkter, t_i og t_{i+1} .

C

Sporstoffkonsentrasjon i et lag, beregnet som sporstoffmasse delt på volum.

V

Volum av et lag eller en boks. Enheten er m^3 .

A

Areal av grenseflaten mellom to vertikale lag. Enheten er m^2 .

Δz

Vertikal avstand mellom midtpunktene i to tilstøtende lag/bokser. Enheten er m .

F_{down}

Netto nedadrettet vertikal sporstofftransport over en grenseflate per tidssteg.

J

Areal- og tidsnormalisert vertikal sporstofffluks. Brukes i beregningen av vertikal turbulent diffusivitet.

C_{up}

Sporstoffkonsentrasjon i midtpunktet av den øvre boksen.

C_{lo}

Sporstoffkonsentrasjon i midtpunktet av den nedre boksen.

g

Tyngdeakselerasjon. Brukes i beregningen av Brunt–Väisälä-frekvensen. Enheten er m/s².

ρ_{ref}

Referansetetthet, beregnet som middelverdien av tettheten i øvre og nedre lag. Enheten er kg/m³.

ρ_{oppe}

Tetthet i det øvre laget.

ρ_{nede}

Tetthet i det nedre laget.

$\Delta\rho$

Tetthetsforskjell mellom to lag.

u

Horisontal strømhastighet i én retning. Enheten er m/s.

v

Horisontal strømhastighet i den andre horisontale retningen. Enheten er m/s.

Δu

Forskjell i u-komponenten av horisontal strømhastighet mellom to lag.

Δv

Forskjell i v-komponenten av horisontal strømhastighet mellom to lag.

K_{z0}

Turbulent diffusivitet uten stabilitetseffekt i Munk-Anderson-relasjonen. Enheten er m²/s.

a

Empirisk parameter i Munk-Anderson-relasjonen.

n

Empirisk eksponent i Munk-Anderson-relasjonen.

PEA

Potensiell energianomali. Brukes som mål på stabilitet og lagdeling i den hydrodynamiske analysen.

AD-modul

Advection–Dispersion-modulen i MIKE 3 FM, brukt til å beregne transport og spredning av sporstoff.

Di1

Første dypvannsinbruddsperiode, 04.01.21–01.01.22.

Di2

Andre dypvannsinbruddsperiode, 24.03.22–01.01.23.

Di3

Tredje dypvannsinbruddsperiode, 18.02.23–01.01.24.

St1

Første stagnasjonsperiode, 02.08.21–01.01.22.

St2

Andre stagnasjonsperiode, 20.07.22–01.01.23.

St3

Tredje stagnasjonsperiode, 04.08.23–01.01.24.

Sammendrag

Denne rapporten vurderer hvordan en åpning i jetéen ved Drøbaksundet kan påvirke vannutskiftning, transportveier og vertikal utveksling i indre Oslofjord. Bakgrunnen for arbeidet er et behov for bedre kunnskap om hvilken betydning jetéen har for vannutskiftningen, og om endringer ved jetéen kan bidra til å påvirke denne. Det er analysert dagens situasjon, Baseline, og to tiltaksscenarioer: Scenario 1 med en relativt grunn åpning, ned til ca. 10,4 m dyp og omtrent 140 m bredde, og Scenario 2 med en dypere åpning, ned til ca. 24 m dyp og omtrent 150 m bredde. Hovedformålet er å undersøke om en ny transportvei i terskelområdet gir målbare endringer i dypvannsinnbrudd, fortynning, utskifting av vannmasser og vertikal blanding i indre Oslofjord, og hvordan disse endringene fordeler seg mellom terskelområdet og de indre bassengene.

Hydrodynamisk grunnlag og analyseoppsett

Oppdraget består av to sammenhengende rapporter. Den første rapporten omhandler hydrodynamisk modellering av Oslofjorden og analyser av strømforhold, transportveier, salttransport og lagdeling, (DHI 2025). Foreliggende rapport bygger videre på de hydrodynamiske simuleringene ved å bruke beregnede strøm- og blandingsfelt som drivfelt i en frikoblet sporstoffmodell, der sporstoff brukes som en passiv markør for å følge hvor vannmassene kommer fra og hvordan de blandes og transporteres i fjorden, slik at effekten av tiltaket kan vurderes gjennom endringer i sammensetning, utskifting og vertikal utveksling. Sporstofftransporten beregnes på den samme romlige oppløsningen som den hydrodynamiske modellen, med alle gridceller inkludert.

Sporstoffene er brukt som passive og konservative markører som følger vannmassene gjennom fjordsystemet. Med konservative markører menes at sporstoffene ikke reagerer kjemisk, brytes ned, sedimenteres eller tilføres/fjernes underveis i modellberegningen, men kun transporteres og blandes med vannmassene. Dette gjør det mulig å skille mellom vann som kommer inn utenfra og vann som allerede befinner seg i systemet, og gir dermed et mer direkte grunnlag for å vurdere utskifting enn salinitet alene.

Analysen omfatter både perioder med dypvannsinnbrudd og perioder dominert av stagnasjon. For stagnasjonsperiodene er utviklingen belyst med tre komplementære analyser, to basert på sporstoff og én basert på den hydrodynamiske analysen, slik at både fortynning, utskifting og utvikling i vertikal blanding og stabilitet kan vurderes.

Den hydrodynamiske analysen viste at scenarioene først og fremst gir en omfordeling av strøm- og transportveier i området rundt Drøbaksundet og Håøya. En større andel av transporten flyttes i scenarioene til den nye åpningen og til alternative løp, og denne effekten er størst i Scenario 2. Samtidig er netto volumtransport gjennom Drøbaksundet tilnærmet uendret, slik en også kan forvente for et snitt som dekker hele sundet. Både positiv og negativ volumtransport hver for seg øker imidlertid noe i scenarioene, særlig i Scenario 2, noe som peker mot noe større vannutveksling gjennom terskelen selv om netto vanntransport i liten grad endres. Den hydrodynamiske analysen kunne derimot ikke alene vise hvor langt denne økte vannutvekslingen forplantet seg innover i fjorden, eller hvor mye av vannet som faktisk bidro til endret sammensetning og utskifting i Vestfjorden og Bunnefjorden. Dette var bakgrunnen for den videre sporstoffanalysen. Den hydrodynamiske analysen viste også at forskjellene i stabilitet mellom Baseline og scenarioene er små sammenlignet med den naturlige sesongvariasjonen, men at Scenario 2 gir større tidsmessige svingninger og mer markerte avvik enn Scenario 1.

Dagens situasjon i fjordsystemet

Resultatene i denne rapporten viser at dagens situasjon er forskjellig i terskelområdet rundt Håøya, i Vestfjorden og i Bunnefjorden, både når det gjelder vannutskiftning, innslag av ytre vannmasser i forbindelse med dypvannsinnbruddene og vertikal blanding. Områdene rundt Håøya har en mer direkte kobling til terskelstrømmer og lokale transportveier, mens Vestfjorden og Bunnefjorden beskriver hvordan vannmassene fordeles videre innover i fjordsystemet. I Vestfjorden er andelen ytre

vannmasser høy i de dypere lagene allerede i Baseline under dypvannsinnsbrudd. I Bunnefjorden etableres signalet i bunnlaget om lag to måneder senere, og toppnivået for andelen ytre vannmasser er lavere enn i Vestfjorden. Områdeinndelingen som ligger til grunn for analysen er vist i Figur 0.1.

Scenarioeffekter

Dypvannsinnsbrudd

Scenario 1 gir økt andel ytre vannmasser i Bunnefjordens bunnlag, rundt 1–2 prosentpoeng. Scenario 2 gir en større økning ved de tre dypvannsinnsbruddsperiodene, med avvik fra Baseline på om lag 2–3 prosentpoeng i den første perioden, 9–10 prosentpoeng i den andre perioden og 6–7 prosentpoeng i den tredje perioden. Dette viser at Scenario 2 i større grad enn Scenario 1 øker andelen ytre vannmasser som trenger videre inn i Bunnefjorden.

Boksvi utskiftningstid og fortynning under stagnasjon

Boksvi utskiftningstid er brukt som et sporstoffbasert mål på hvor raskt vannet i de definerte boksene fortynnes og erstattes under stagnasjon. Analysene viser små, men positive endringer i de indre bassengene sammenlignet med Baseline. I Bunnefjordens bunnlag reduseres boksvi utskiftningstid med om lag 2 % i Scenario 1 og om lag 5 % i Scenario 2, mens reduksjonen i Vestfjordens bunnlag er rundt 2 % i begge scenarioer. Endringene i Vestfjorden og Bunnefjorden går dermed i hovedsak i positiv retning, ved at vannet i de definerte boksene fortynnes og erstattes noe raskere enn i Baseline. Rundt Håøya opptrer tydelige og motsatte responser på vest- og østsiden. På vestsiden blir boksvi utskiftningstid klart kortere enn i Baseline, mens den på østsiden blir lengre. Dette viser at scenarioene først og fremst påvirker strømforhold, lokal fortynning og stabilitet i terskelområdet rundt Håøya som følge av endringer i jetéen.

Vertikal blanding og stabilitet

Resultatene for vertikal blanding og stabilitet peker i samme retning. I Bunnefjorden og Vestfjorden er endringene små, men de peker samlet mot noe større vertikal utveksling og noe mindre stabilitet enn i Baseline. Beregningene viser i hovedsak svakt større vertikal utveksling og noe mindre stabilitet enn i Baseline, særlig i Bunnefjorden og særlig i Scenario 2. I Bunnefjorden øker den beregnede vertikale utvekslingen med om lag 2–12 %, mens stabiliteten i de dypere lagene reduseres med om lag 5–8 %. I Vestfjorden er endringene mindre, men også der peker de samlet ikke mot dårligere blandingsforhold. Dette er en viktig nyanse fordi tidligere vurderinger av inngrep ved Drøbakerskelen har lagt vekt på at redusert tidevannshastighet kunne gi mindre energi til indre bølger og dermed svakere vertikal blanding. Resultatene i denne rapporten støtter ikke en tilsvarende negativ respons i de indre bassengene.

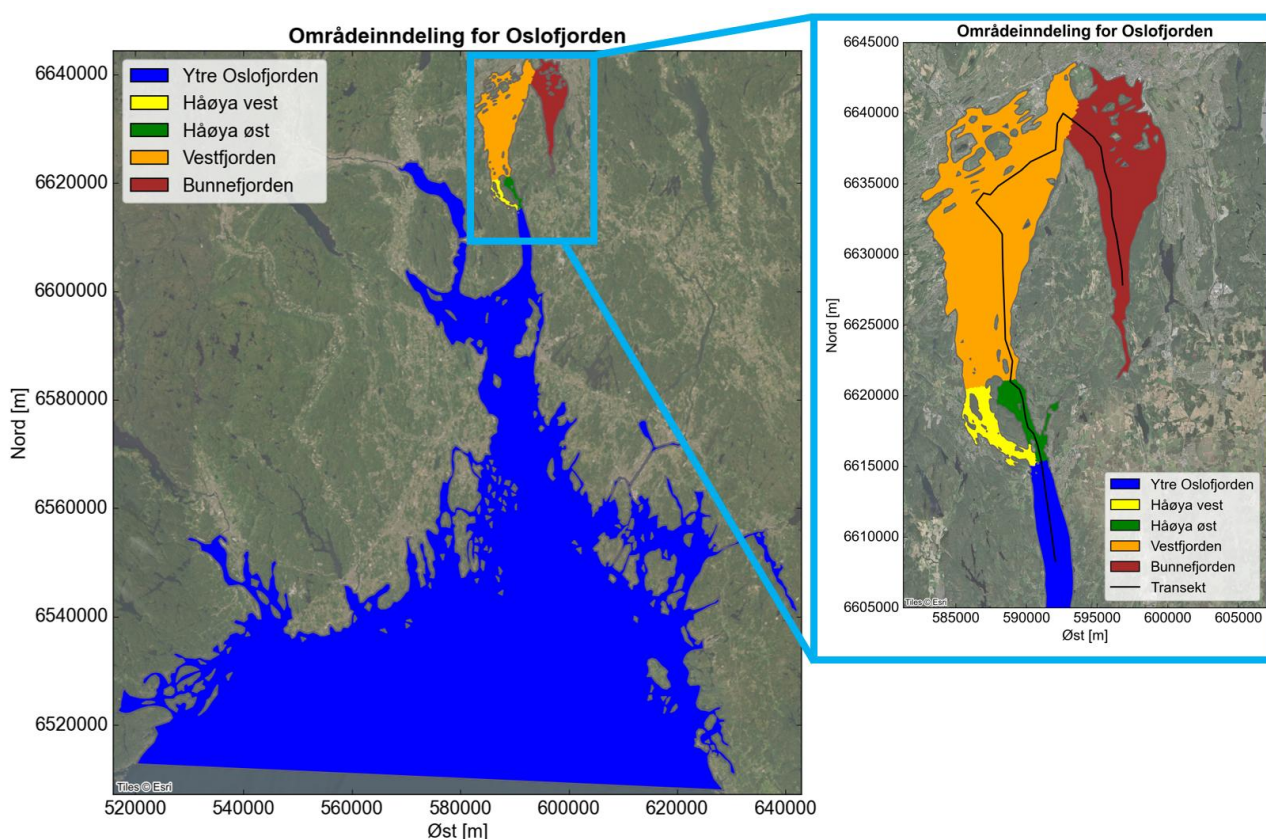
Også for vertikal blanding viser analysene tydelige og sammensatte endringer rundt Håøya, med motsatt respons på vest- og østsiden. På vestsiden reduseres stabiliteten markant, mens østsiden blir mer stabil enn i Baseline. Den vertikale utvekslingen mellom de øvre vannlagene reduseres både i Håøya vest og Håøya øst, mens Håøya vest skiller seg ut ved at utvekslingen mellom de dypere lagene er tilnærmet uendret i Scenario 1 og høyere i Scenario 2. Dette viser at scenarioene først og fremst endrer fordelingen av blanding og stabilitet i terskelområdet rundt Håøya, snarere enn å gi en stor økning eller reduksjon i vertikal blanding i hele fjordsystemet.

Sammenheng med tidligere studier og begrensninger

Sammenlignet med tidligere litteratur gir resultatene et mer nyansert bilde av hvordan endringer i terskelområdet påvirker vannutskifting og vertikal blanding i indre Oslofjord. Tidligere studier har vist at tidevannsstrøm over Drøbakerskelen, indre bølger og vertikal blanding er sentrale mekanismer for dypvannsfornyelse. Direkte analyser av effekten av endringer i jetéen er imidlertid begrenset, og ett av de få studiene (Stigebrandt og Magnusson 2002) anslår at indre bølgeenergi, og dermed vertikal turbulens, kan reduseres noe. Senere studier har imidlertid ikke kunnet påvise en tydelig kvantitativ sammenheng mellom slike inngrep og redusert vertikal blanding i de indre bassengene. Resultatene i denne rapporten er i tråd med tidligere studier når det gjelder de overordnede prosessene og hvor i systemet effektene opptrer, men viser samtidig at endringer i jetéen i hovedsak gir en omfordeling av

transport og utveksling i terskelområdet. I Vestfjorden og Bunnefjorden er endringene små, og peker ikke mot redusert vertikal blanding, men snarere mot svakt økt vertikal utveksling, særlig i Scenario 2.

Samtidig er det viktig å være nøktern i tolkningen av resultatene. Rapporten viser fysiske endringer i transport, vannmassesammensetning, fortynning og vertikal utveksling, men kvantifiserer ikke direkte hvordan dette slår ut på oksygenforhold, biogeokjemiske prosesser eller økologisk tilstand. Resultatene er også påvirket av valg av analyseperioder og av at fjorden er delt inn i delområder og dybdelag som et forenklet analyseverktøy. Dette gir noe usikkerhet i de eksakte tallverdiene, men hovedbildet vurderes som robust: Scenario 2 gir gjennomgående større endringer enn Scenario 1. Effekten er hovedsakelig knyttet til terskelområdet. I de indre bassengene viser resultatene små, men gjennomgående positive endringer sammenlignet med dagens situasjon. Under dypvannsinnsbrudd øker andelen ytre vannmasser, mens analysene av stagnasjonsperiodene viser at vannet fortynnes og erstattes noe raskere, og at resultatene samlet peker mot noe større vertikal utveksling og noe mindre stabilitet.



Figur 0.1 Oversikt over hvordan vi har delt Oslofjorden opp i fem områder, der det er zoomet inn på Oslofjorden, er det også tegnet inn en transekt i Figur 3.2.

1 Introduksjon

Denne rapporten inngår i et todelt oppdrag om vannutskifting i indre Oslofjord. Første del av oppdraget omfatter hydrodynamisk modellering av Oslofjorden og analyser av strømforhold, transportveier, salttransport og lagdeling ved dagens situasjon og to tiltaksscenarioer (DHI 2025). Foreliggende rapport bygger videre på disse simuleringene ved å bruke beregnede strøm- og blandingsfelt som drivfelt i en frikoblet sporstoffmodell.

Bakgrunnen for arbeidet er Kystverkets behov for bedre kunnskap om betydningen av Drøbaksjetéen for vannutskiftningen i Oslofjorden, og om mulige tiltak ved jetéen kan påvirke denne. Arbeidet er knyttet til tiltak K15 i helhetlig tiltaksplan for Oslofjorden, som sier: *Utrede problemstillinger knyttet til vannutskifting til Indre Oslofjord gjennom Drøbaksundet v/Oscarsborg og mulige tiltak for eventuelt å bedre vannutskiftningen. Mulige tiltak må vurderes opp mot andre hensyn, herunder jetéens kulturhistoriske verdier.*

Formålet med denne rapporten er å undersøke om en ny åpning i jetéen ved Drøbaksundet gir målbare endringer i dypvannsinnbrudd og vertikal blanding i indre Oslofjord, og hvordan slike endringer fordeler seg mellom terskelområdet og de indre bassengene. Disse størrelsene er valgt fordi den hydrodynamiske analysen, som i hovedsak bygget på salinitet og salttransport, ikke alene kunne vise hvor vannmassene i dypet kom fra. Sporstoffmodellen gjør det mulig å skille mellom nytt vann som strømmer inn utenfra og vann som allerede har vært i fjordsystemet, og gir dermed et mer direkte grunnlag for å vurdere utskifting av vannmassene enn salinitet alene.

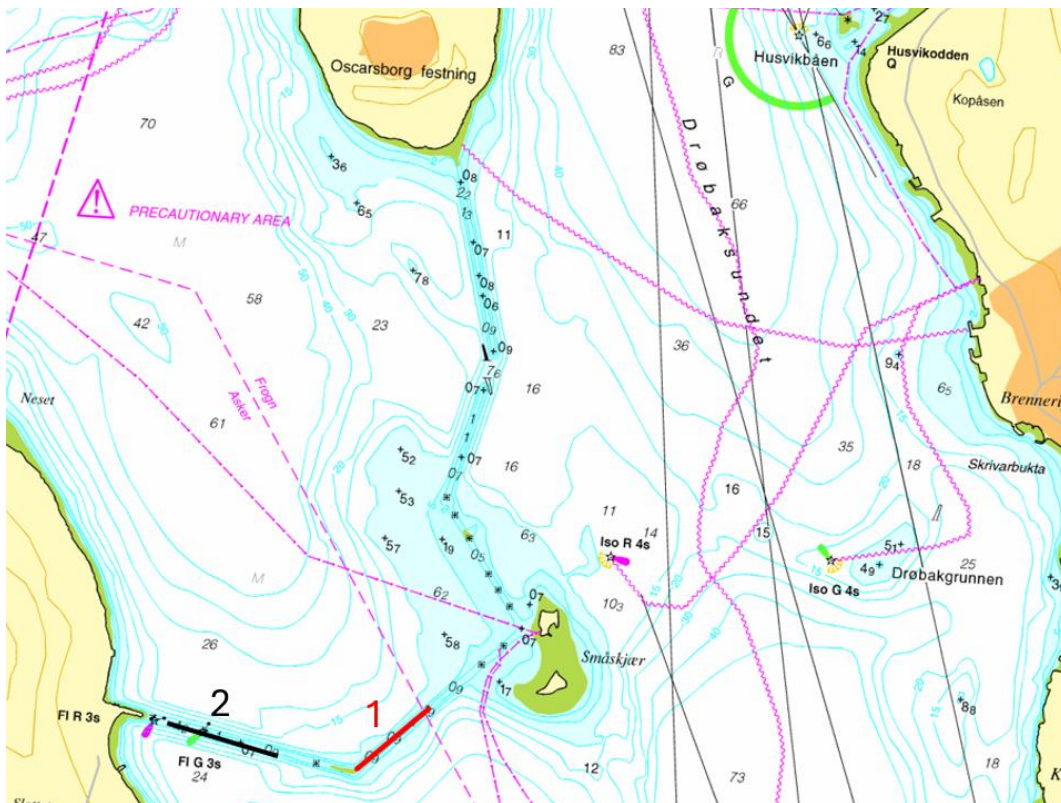
Analysen er avgrenset til dagens situasjon (Baseline) og to tiltaksscenarioer. Scenario 1 omfatter en relativt grunn åpning ned til ca. 10,4 m dyp og omtrent 140 m bredde, mens Scenario 2 omfatter en dypere åpning ned til ca. 24 m dyp og omtrent 150 m bredde. Åpningene er vist med henholdsvis rød (Scenario 1) og svart (Scenario 2) markør i Figur 1.1. I dag er jetéen ca. 1 m under vannoverflaten, med noen små åpninger for fritidsbåter, og et skematisk oversiktsbilde over jetéen og Drøbaksterskelen er vist i Figur 1.3. Scenario 1 er valgt fordi det bygger på et tidligere planlagt farledsprosjekt i Drøbaksundet, mens Scenario 2 er valgt for å undersøke effekten av å åpne den dypeste delen av jetéen, som er antatt å kunne gi størst påvirkning.

For å vurdere konsekvensene av slike endringer ble det utviklet en hydrodynamisk modell i MIKE 3 som dekker hele Oslofjorden, fra Portør og Resø i sør til Bunnefjorden og de indre delene av fjordsystemet i nord. Modellen er basert på fjordens nåværende tilstand, Baseline, og er kjørt for perioden 2018–2023. Modellområdet er vist i Figur 1.2.

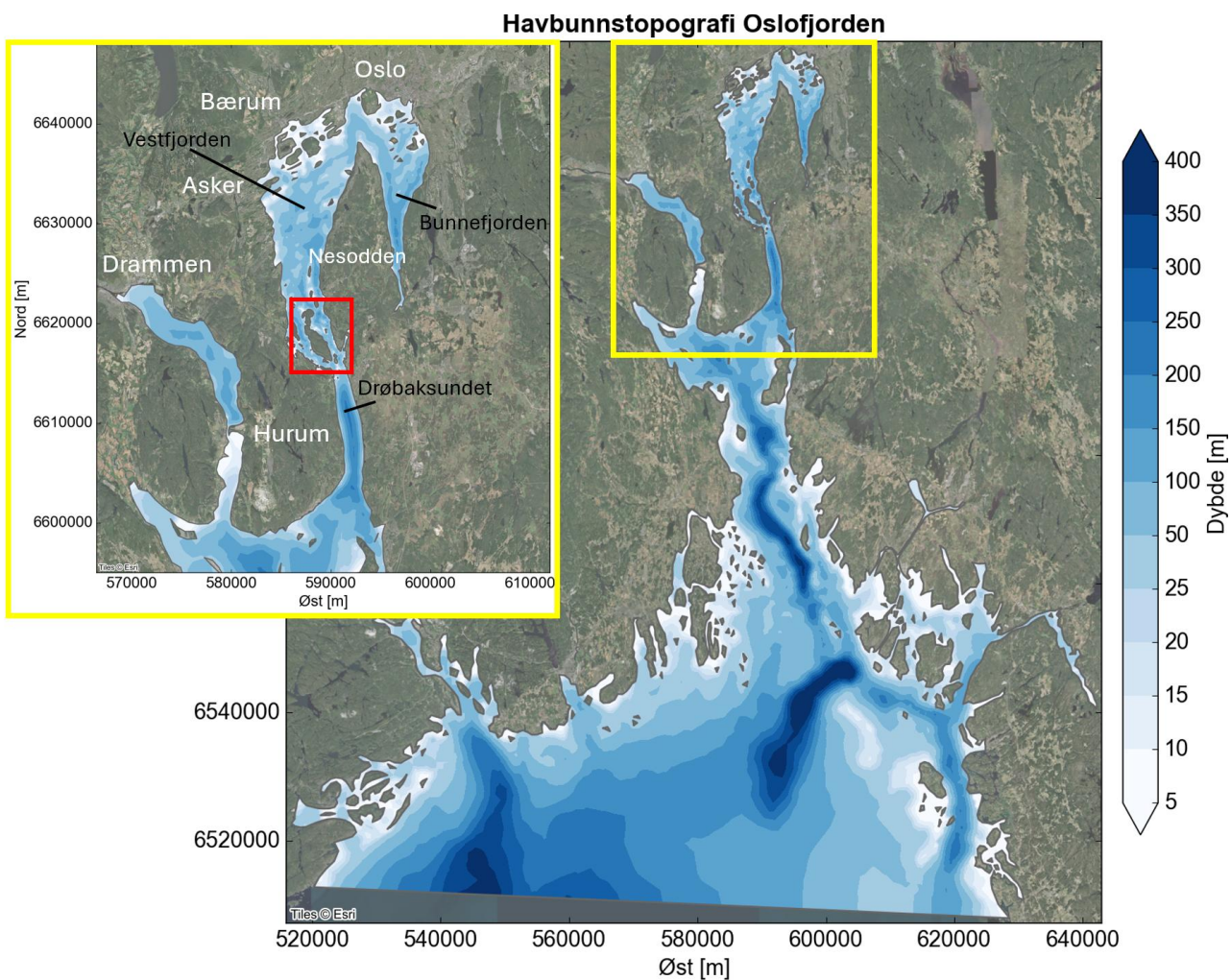
Den hydrodynamiske rapporten viste at tiltaket først og fremst endrer hvordan vannet beveger seg i terskelområdet, og hvordan transporten fordeles mellom løpene rundt Drøbak og Håøya. Scenario 1 påvirker særlig strømforholdene i overflatelagene, mens Scenario 2 også gir dypere vannlag en alternativ transportvei inn i fjorden. Samtidig viste den hydrodynamiske analysen at de naturlige dypvannsinnbruddene fortsatt forekommer i scenarioene, men at Scenario 2 gir saltere og tyngre vannmasser i dypet og større tidsmessige svingninger i vertikal stabilitet.

Mens den hydrodynamiske rapporten beskriver hvordan tiltaket påvirker strømfelt, transportmønster, salttransport og lagdeling, er hensikten med foreliggende rapport å vurdere hvordan disse endringene slår ut i vannmassenes sammensetning, utskifting og vertikale utveksling. Sporstoffmodellen gjør det dermed mulig å skille tydeligere mellom endringer i transportveier nær terskelen og effekter som faktisk forplanter seg inn i Vestfjorden og Bunnefjorden.

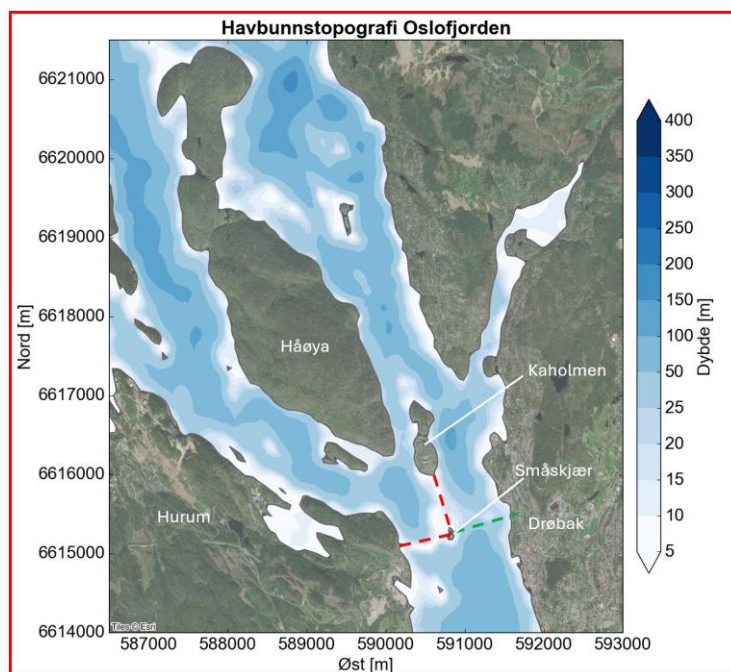
Rapporten er bygget opp slik at kapittel 2 oppsummerer hovedfunnene fra den hydrodynamiske analysen, kapittel 3 beskriver sporstoffmodellen og metoden til analysene, kapittel 4 presenterer resultatene, kapittel 5 diskuterer funnene i lys av den hydrodynamiske rapporten og tidligere litteratur, og kapittel 6 sammenfatter de viktigste konklusjonene.



Figur 1.1 Oversikt over endring i den vestlige jetéen, en 140 m utdypning ned til 10,4 m i Scenario 1 og en åpning på 150 m med en utdypning til 24 m i Scenario 2, begge mellom Småskjær og Hurumlandet, markert med henholdsvis rødt og sort linje. Kartdata hentet fra www.kystinfo.no.



Figur 1.2 Modellområdet til den hydrodynamiske modellen for Oslofjorden, fargene representerer dybdene.



Figur 1.3 Skjematisk oversiktsbilde som viser plasseringen til de viktigste områdene, jetéen (rød stiplet linje) og Drøbaksterskelen (grønn stiplet linje).

2 Hydrodynamisk modell av Oslofjorden

2.1 Oppsummering av funn og tolkning

Den hydrodynamiske rapporten vurderer hvordan et mulig tiltak ved jetéen mellom Småskjær og Hurumlandet kan påvirke vannutskiftningen i Indre Oslofjord. Drøbaksundet fungerer i dag som den viktigste terskelen for vannutveksling mellom ytre og indre fjordområder, og selv relativt små fysiske endringer i dette området kan påvirke strømforhold, transportveier og saltbalanse. For å undersøke dette er det etablert en tredimensjonal, høyoppløst hydrodynamisk modell av Oslofjorden, kalibrert mot målinger fra 2018–2019 og validert mot data fra 2020–2023. Valideringen viser godt samsvar med observerte tidsserier for vannstand, temperatur og salinitet, og modellen vurderes som egnet til å analysere prosesser som dypvannsinnsbrudd, lagdeling og vertikal blanding i fjordsystemet. (DHI 2025)

2.2 Scenarier

Det er gjennomført simuleringer for dagens situasjon (Baseline) og to tiltaksscenarier:

- **Scenario 1:** åpning i jetéen ned til 10,4 m dyp (grunn åpning) på 140 m bredde
- **Scenario 2:** åpning i jetéen ned til 24 m dyp (dyp åpning) på 150 m bredde

Konsekvenser er vurdert gjennom (1) analyser av nettostrøm på ulike dyp, (2) volum- og salttransport i representative tverrsnitt, og (3) utvikling i salinitet og lagdeling ved utvalgte målestasjoner, inkludert vurdering av stabilitet gjennom potensiell energianomali (PEA).

2.3 Hovedfunn

Et gjennomgående resultat er at en åpning i jetéen gir en tydelig omfordeling av strøm- og transportveier i området rundt Drøbaksundet og Håøya, ved at netto akkumulert transport fordeles annerledes mellom terskelen, løpene rundt Håøya og den nye jetéåpningen.

Når man ser på salttransport og salinitet, fremkommer likevel et mer nyansert bilde. Både Scenario 1 og Scenario 2 viser høyere akkumulert saltinnstrømning enn Baseline, og analysene indikerer en svak, men systematisk økning i samlet tilførsel av saltvann gjennom Drøbaksundet – i størrelsesorden om lag 2 % i Scenario 1 og om lag 6 % i Scenario 2. Effekten er tydeligst i Scenario 2. Samtidig må dette tolkes varsomt: økt akkumulert salttransport kan reflektere både mer innstrømmende saltvann og/eller mindre utstrømming av salt (dvs. endret balanse mellom inn- og uttransport), samt at samme vannmasser kan registreres flere ganger dersom de beveger seg fram og tilbake over et tverrsnitt.

2.4 Scenario 1

I Scenario 1 er endringene tydeligst i overflatelagene. Åpningen fungerer som en ny utløpsvei for ferskere overflatevann. Dette gir økt utstrømning gjennom jetéåpningen og samtidig redusert transport både i passasjen mellom Kaholmen og Håøya og i løpet øst for Småskjær over Drøbaksterskelen. Transportanalysene viser at en større andel av innstrømningen i de øvre lagene går gjennom jetéåpningen, mens transporten avtar både i passasjen mellom Kaholmen og Håøya og i løpet øst for Småskjær over Drøbaksterskelen. Samlet fremstår Scenario 1 som en «topplagsstyrt» endring: dypvannsinnsstrømningen følger i hovedsak fortsatt løpet øst for Småskjær over terskelen, mens overflate- og mellomsgikt i større grad omdirigeres via jetéåpningen.

Når det gjelder blanding og lagdeling gir Scenario 1 et mer variabelt bilde. Ved noen målestasjoner og i enkelte perioder antyder utviklingen i bunnsalinitet at vertikal blanding endres noe saktere enn i Baseline, mens andre stasjoner viser det motsatte. Dette understøtter at effekten i Scenario 1 i stor grad handler om omfordeling og lokale responser.

2.5 Scenario 2

I Scenario 2, der åpningen er dypere (24 m), blir responsen mer sammensatt og mer tydelig i hele vannsøylen. Den dypere åpningen gir dypvannet en alternativ innstrømningsvei til Indre Oslofjord. Dette betyr at en andel av dypvannsinnbruddene som i dag må passere over Drøbaksterskelen mellom Småskjær og Drøbak, i Scenario 2 kan gå gjennom jetéåpningen. Transportanalysene viser derfor redusert volum- og salttransport over terskelsnittet sammenlignet med Scenario 1, samtidig som salttransporten gjennom jetéåpningen øker kraftig. I tillegg svekkes utstrømningen gjennom enkelte snitt (bl.a. Hurum–Håøya), noe som indikerer at vann som tidligere fulgte «gamle» løp i større grad omdirigeres via den nye åpningen.

Et sentralt funn i Scenario 2 er at selv om det tilføres mer saltvann i dypere lag, viser utviklingen i bunnsalinitet ved flere stasjoner en tendens til saktere reduksjon i salinitet i stagnasjonsperioder, som kunne tolkes som tregere vertikal blanding sammenlignet med Baseline. En plausibel mekanisme er at økt salinitet i dypet gir sterkere tetthetsforskjeller mellom overflate og bunn, som igjen kan gi sterkere lagdeling og dermed høyere energibarriere for vertikal oppblanding. Dette kan innebære at bunnvannet, selv om det blir saltere og tyngre, ikke nødvendigvis fornyes raskere, fordi sterkere lagdeling kan redusere den vertikale blandingen som bidrar til å senke tettheten i bunnvannet mellom innbruddene.. Dette er en viktig tolkningsmessig nyanse i rapporten: mer saltvann inn betyr ikke automatisk bedre vannutskiftning.

2.6 Dypvannsinnbrudd

Et tydelig funn er at alle dypvannsinnbrudd som identifiseres i Baseline også forekommer i Scenario 1 og Scenario 2. Dette indikerer at åpningen i jetéen ikke hindrer terskelpassering og tilførsel av nytt dypvann til fjordsystemet. Forskjellen ligger i større grad i hvilken vei innbruddene tar, og hvordan de påvirker fordeling av transport, lagdeling og blandingsprosesser etter innstrømning.

2.7 Potensiell energianomali

Analysene av vannsøylens stabilitet gjennom potensiell energianomali (PEA) viser at forskjellene mellom Baseline og scenarioene er små i gjennomsnitt sammenlignet med den naturlige sesongvariasjonen i fjorden. Likevel er et tydelig signal at Scenario 2 gir større svingninger i stabilitet over tid, med omvekslende perioder med både økt oppblanding og økt lagdeling. Dette er konsistent med transportanalysene: en dypere åpning introduserer en ny dypvannsvei og dermed mer variabel gjennomstrømning og omfordeling. I tillegg fremkommer tidevannsrelaterte variasjoner som i stor grad kan forklares med små faseforskyvninger i tidevannsstrømmene, et signal som i tidsserier fremstår som «støy» med liten amplitude, men som understreker at dynamikken kan endres uten at gjennomsnittsforholdene endres tilsvarende.

3 Metode

3.1 Oppsett av sporstoffmodell

For å undersøke vertikal blanding og utveksling mellom vannlag og delområder i indre Oslofjord er det satt opp en sporstoffmodell. Boksvise utskiftningstid brukes her som et sporstoffbasert mål på hvor raskt vannet i en definert modellboks fortynnes og erstattes gjennom utveksling med andre bokser. Fordi boksene er definert både geografisk og vertikalt, beskriver størrelsen samlet utveksling mellom bassenger og mellom lag. Modellen er beregnet med en frikoblet metode, der de hydrodynamiske resultatene fra tidligere simuleringer brukes som drivfelt. Den hydrodynamiske modellen dekker perioden 2018–2023, mens sporstoffberegningene i denne rapporten er gjennomført for delperioden 2021–2023. Transport og spredning av sporstoff beregnes deretter med MIKE 3 FM Advection–Dispersion (AD)-modulen (DHI 2024), basert på strømfelt, turbulens og øvrige relevante hydrodynamiske variabler fra den hydrodynamiske simuleringen. Dette er gjort for Baseline samt Scenario 1 og Scenario 2, slik at effekten av en åpning i jetéen kan vurderes ved å sammenligne hvordan sporstoff fordeler seg og blandes i de ulike tilfellene.

For de tre modelleringsårene var det ønskelig å belyse to typer situasjoner i indre Oslofjord:

- Perioder med dypvannsinnsbrudd (fornyelse).
- Perioder preget av stagnasjon.

Sporstoffene representerer passive og konservative markører som følger vannmassens bevegelse (adveksjon) og blandes ved turbulente prosesser (diffusjon/dispersjon). Dette gir et grunnlag for å beregne og tolke både styrken på dypvannsinnsbruddene, boksvise utskiftningstid, det vil si hvor lenge vannet i en definert modellboks blir værende før det erstattes, og vertikal utveksling mellom vannlag.

Oslofjorden deles inn i fem geografiske delområder (vist i Figur 3.1). Alle sporstoff-komponentene i modellen er:

Bunnefjorden	Vestfjorden	Håøya vest	Håøya øst	Ytre Oslofjorden
Top	Top	Top	Top	Top
Umid	Umid	Umid	Umid	Umid
Lmid	Lmid	Lmid	Lmid	Lmid
Bot	Bot	Bot	Bot	Bot

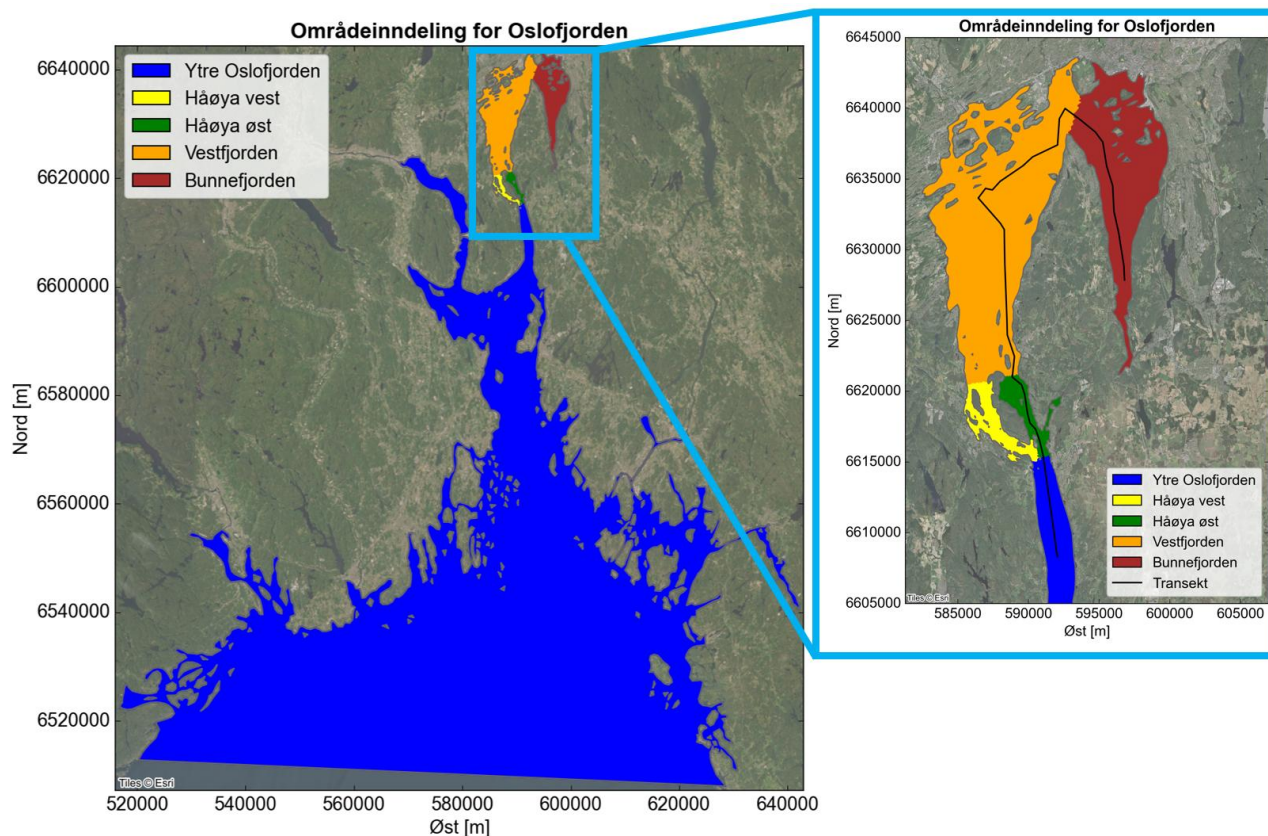
Dette gir totalt 20 interne sporstoff-komponenter, i tillegg til ett sporstoff som representerer påvirkning fra modellgrensen i Skagerrak.

Begrunnelse for valg av vertikal inndeling, kommer på bakgrunn av vertikale profiler ved Dk1 og Ep1 i (DHI 2025) som viser at pyknoklinen varierer i dybde, typisk innenfor 25–50 m. På denne bakgrunnen er «Umid» definert fra 26 til 75 m for å fange både variasjoner i pyknoklinens posisjon og overgangen mot dypere vannmasser. «Lmid» (75–103 m) representerer hoveddelen av dypvannet i indre Oslofjord, mens «Bot» (>103 m) dekker de aller dypeste delene av fjordsystemet. Sistnevnte lag opptar et mindre areal i indre fjord, og er derfor mindre representativt for bassengene som helhet, men er likevel relevant der disse dypene forekommer.

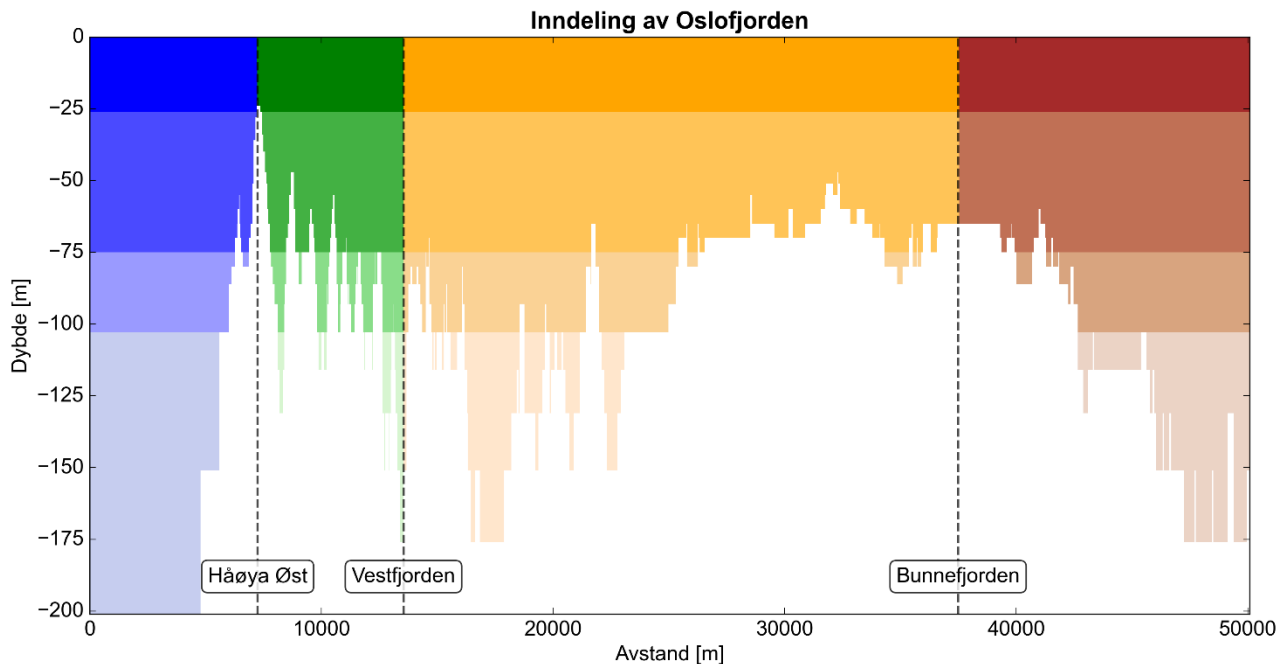
Inndelingen i “bokser” brukes her som en kategorisering av sporstoffkilder, og innebærer ikke at den hydrodynamiske modellen reduseres til en boksmoell. Den romlige oppløsningen (grid og celler) er den samme som i den hydrodynamiske modellen. Forskjellen er at alle modellceller innenfor hvert område og hvert vertikallag knyttes til en egen sporstoff-komponent. Lengdeprofil som illustrerer den vertikale boksinnndelingen er vist i Figur 3.1.

Boksinndelingen er dermed et analysegrep som forenkler et høyoppløst tredimensjonalt modellfelt til geografiske delområder og dybdelag. Dette gjør resultatene lettere å sammenligne mellom områder og scenarier, men innebærer også at interne variasjoner innenfor en boks ikke beskrives eksplisitt i de boksvise resultatene.

Alle interne sporstoff-komponenter settes med en initial konsentrasjon på 100 i sine respektive områder/lag. I tillegg settes konsentrasjonen ved modellgrensen til 100 for et eget sporstoff som representerer grensepåvirkningen, betegnet Skagerrak. Dette kan forstås som en grenseverdi/markør som gjør det mulig å skille bidrag fra ytre vannmasser ved modellgrensen fra omfordeling mellom de interne områdene.



Figur 3.1 Oversikt over hvordan vi har delt Oslofjorden opp i fem områder, der det er zoomet inn på Oslofjorden, er det også tegnet inn en transekt.



Figur 3.2 Transekt fra litt utenfor Drøbaksterskelen inn til Bunnefjorden, vist i Figur 3.1, man kan se på de forskjellige fargenyansene hvordan sporstoffet er fordelt i «bokser» i dybden.

3.2 Valg av perioder

For å kunne kvantifisere utskiftning og horisontal og vertikal utveksling med sporstoff er analysen i denne rapporten hendelses- og periodebasert, og kan derfor ikke gjennomføres som én sammenhengende, kontinuerlig beregning over hele modellperioden. Sporstoffmetodikken bygger på at en definert vannmasse i et avgrenset område/lag «merkes» ved et valgt starttidspunkt, og at utviklingen i denne merkingen følges framover i tid. Resultatene, for eksempel boksvis utskiftningstid og endringer i sammensetning, vil derfor være følsomme for hvilket starttidspunkt som velges, fordi starttidspunktet bestemmer hvilke vannmasser som inngår i den merkede starttilstanden og hvilke ytre drivere, innbrudd, sesong og strøm, som virker i perioden som følger.

Starttidspunktene er derfor valgt med omhu for å gi robuste og representative resultater for tre modelleringsår. Det er valgt perioder som dekker både situasjoner med dypvannsinnebrudd og lengre stagnasjonsperioder, slik at analysene belyser responsen både når nytt vann strømmer inn og når dypvannet i større grad utvikler seg uten tydelige nye tilførsler. Denne kombinasjonen gir et mer dekkende grunnlag for å sammenligne Baseline og scenarioene enn å basere vurderingen på én enkelt hendelse eller én enkelt stagnasjonsperiode.

I denne rapporten brukes saltholdighet som primær indikator: dypvannsinnebrudd kjennes igjen på økt saltholdighet i bunnlaget, mens stagnasjon er fravær av slike økninger over tid.

Det ble derfor valgt totalt seks starttidspunkter: tre tidspunkter knyttet til hendelser der saltet dypvann strømmer inn i Bunnefjorden og Vestfjorden, samt tre tidspunkter som representerer lengre stagnasjonsperioder, der dypvannet i større grad påvirkes av intern utvikling og vertikal utveksling snarere enn nye dypvannsinnebrudd.

Tidspunktene ble bestemt ved å analysere tidsserier for saltholdighet fra den hydrodynamiske modellen i det dypeste punktet ved målestasjonene i Bunnefjorden (Ep1) og Vestfjorden (Dk1). På bakgrunn av disse tidsseriene ble seks perioder valgt ut. Periodene som starter med dypvannsinnebrudd er vist i Figur 3.3, mens de tre stagnante periodene er vist i Figur 3.4.

Starttidspunktet for dypvannsperiodene ble definert der innbruddet starter ved terskelen (dvs. når endringen i dypvannsegenskaper først kan identifiseres der). For å sikre sammenlignbarhet brukes samme startdato og tidspunkt i alle scenarioer og år.

Starttidspunktene for stagnasjonsperiodene ble valgt når stagnasjonen vurderes å være etablert. Dette ble operasjonalisert ved at tidsseriene ved Dk1 ikke lenger viser at lagkurvene krysser hverandre – dvs. rekkefølgen mellom lagene er stabil over tid – og ved at det ikke observeres nye dypvannsinnbrudd ved Gk1 i Gråøyrenn (Figur 3.5). På denne måten representerer stagnasjonsperiodene situasjoner der dypvannet i hovedsak utvikler seg uten tydelige, nye tilførsler av saltere vann utenfra.

De valgte stagnasjonsperiodene må forstås som perioder der stagnasjon er den dominerende tilstanden, ikke som perioder uten innstrømning eller omfordeling av vannmasser. Det forekommer enkelte mindre innslag av saltere vann også innenfor disse periodene, og omfanget varierer mellom år, lag og bassenger. Dette innebærer at resultatene fra stagnasjonsperiodene ikke beskriver et ideelt lukket og fullstendig stasjonært system, men en periode der dypvannet i hovedsak utvikler seg uten større dypvannsinnbrudd.

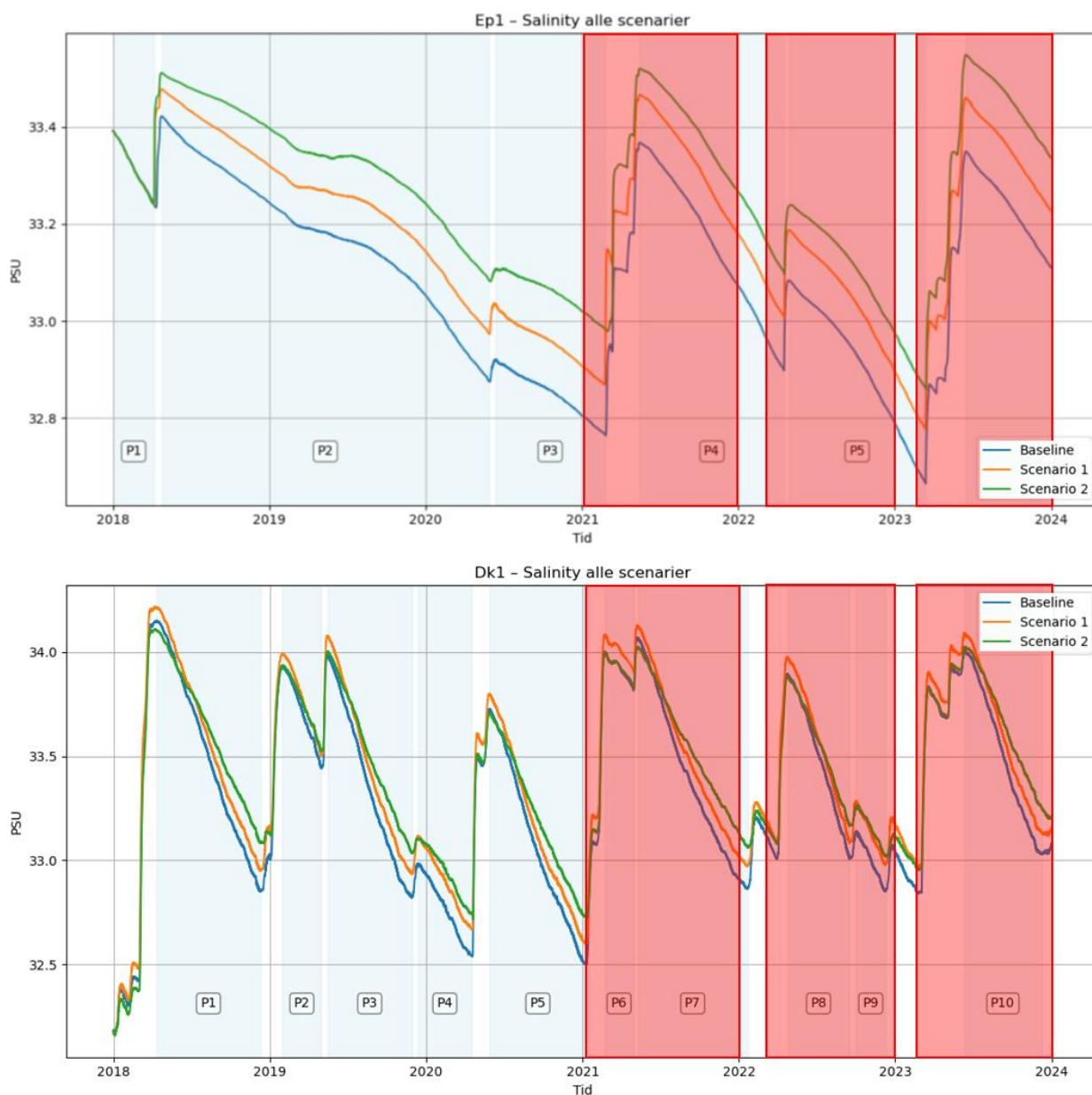
For 2022 ble det ikke identifisert en periode som er sammenhengende stagnasjon “ut året” i Gråøyrenna og Vestfjorden. Som vist i figuren for stagnasjonsperiodene forekommer det en innblanding/tilførsel av noe saltere vann midt i perioden, som bryter kriteriet om vedvarende stagnasjon. Men i Bunnefjorden er det stabilt i denne perioden.

Disse periodene ble valgt for dypvannsinnbrudd:

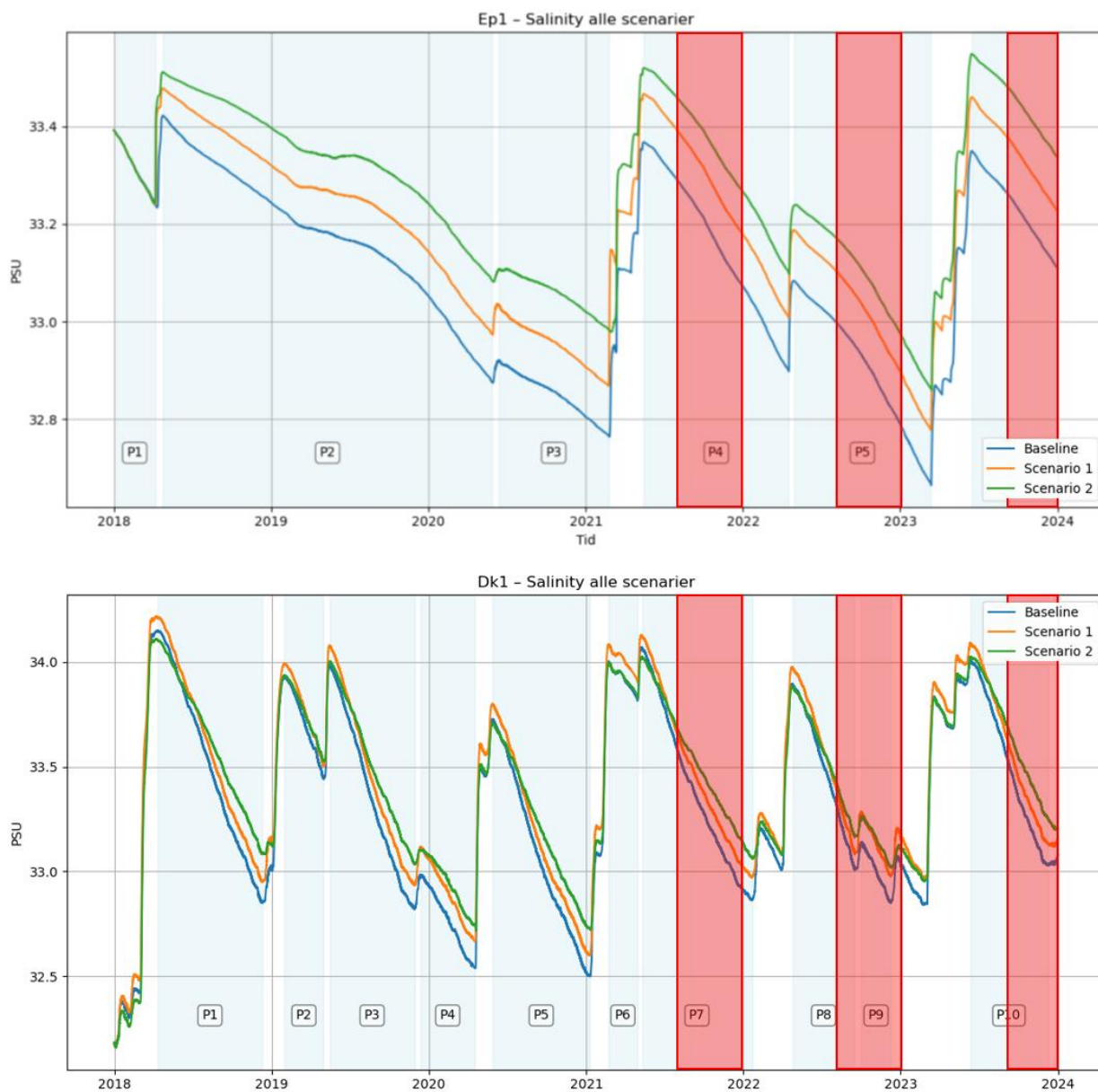
- 04.01.21 – 01.01.22 (Di1)
- 24.03.22 – 01.01.23 (Di2)
- 18.02.23 – 01.01.24 (Di3)

Disse periodene ble valgt for de stagnante periodene:

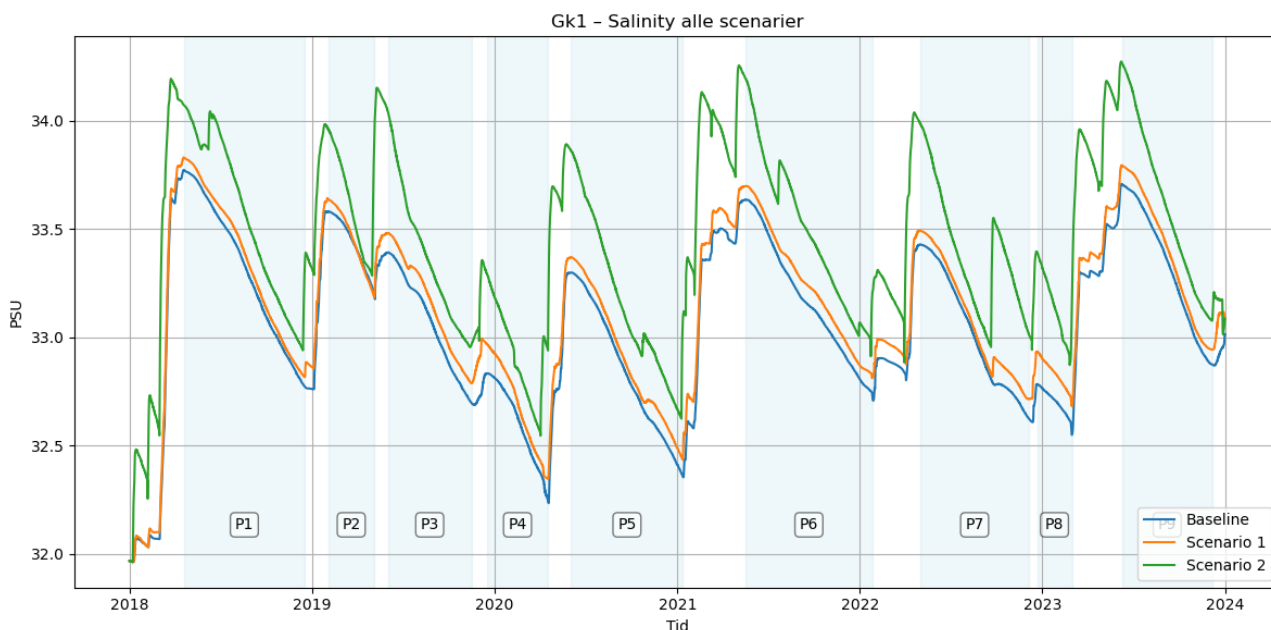
- 02.08.21 – 01.01.22 (St1)
- 20.07.22 – 01.01.23 (St2)
- 04.08.23 – 01.01.24 (St3)



Figur 3.3 Tidsserien til det dypeste punktet ved målestasjonene den øverste figuren viser Ep1, som ligger i Bunnefjorden, mens den nederste figuren viser Dk1 som ligger i Vestfjorden. De modellerte periodene som starter med dypvannsinnbrudd er markert i rødt. Figuren er tatt fra (DHI 2025)



Figur 3.4 Tidsserien til det dypeste punktet ved målestasjonene den øverste figuren viser Ep1, som ligger i Bunnefjorden, mens den nederste figuren viser Dk1 som ligger i Vestfjorden. De stagnante periodene som er modellert er markert i rødt. Figuren er tatt fra (DHI 2025).



Figur 3.5 Tidsserien for salinitet i det dypeste punktet for målestasjonen GK1 som ligger i Håøya vest, tatt fra (DHI 2025).

3.3 Dypvannsinnsbrudd

Formålet med analysen er å kvantifisere hvordan andelen ytre vannmasser utvikler seg i utvalgte bokser (Vestfjorden og Bunnefjorden Bot) under dypvannsinnsbrudd, og hvordan denne utviklingen endres mellom Baseline, Scenario 1 og Scenario 2. Analysen er rettet mot de tre periodene med dypvannsinnsbrudd, der indre Oslofjord forventes å få tilførsel av nytt vann, og der tiltakene knyttet til jetéåpningen antas å kunne gi størst effekt på utskiftingsmønsteret.

Sporstoffmodellen beregner tidsutviklingen for alle sporstoffkomponenter i hver boks. For hvert scenario og hver boks beregnes den totale sporstoffmengden per tidspunkt ved å summere over alle komponenter, og den prosentvise andelen for hver komponent beregnes som komponentens bidrag delt på totalen. Denne normaliseringen gir en direkte tolkbar størrelse, der innholdet i en boks kan uttrykkes som en prosentvis fordeling mellom ulike kilder:

$$C_i(t) = 100 \cdot \frac{M_i(t)}{\sum_j M_j(t)}$$

Der $C_i(t)$ er den prosentvise andelen av sporstoffkomponent i på tidspunkt t , $M_i(t)$ er sporstoffmassen av komponent i på samme tidspunkt, og $\sum_j M_j(t)$ er den totale sporstoffmassen i boksen summert over alle komponenter j . Faktoren 100 gjør at $C_i(t)$ uttrykkes i prosent, slik at enheten til resultatet er prosent (%).

Resultatene for dypvannsinnsbrudd presentert med fokus på de sammenslåtte ytre komponentene, Ytre Oslofjorden + Skagerrak. Disse brukes som et samlet mål på innslag av ytre vannmasser i de analyserte boksene. Resultatene presenteres for lagene Umid, Lmid og Bot i Vestfjorden og Bunnefjorden. Denne framstillingen er valgt for å gi et tydelig bilde av hvordan innslaget av ytre vannmasser utvikler seg gjennom de tre dypvannsinnsbruddsperiodene, og hvordan dette endres i scenarioene relativt til Baseline.

For å synliggjøre effekten av tiltakene beregnes differanser mellom hvert scenario og Baseline. Differansene uttrykkes i prosentpoeng, slik at en positiv differanse betyr at andelen ytre vannmasser er høyere i scenarioet enn i Baseline, mens en negativ differanse betyr at andelen er lavere. I tillegg til full

tidsoppløsning beregnes månedlige middelveier for bunnlaget, slik at utviklingen i Bot kan oppsummeres i tabellform.

Denne framgangsmåten gjør det mulig å beskrive både når signalet fra ytre vannmasser etableres i de ulike lagene, hvor lenge det vedvarer, og hvor store endringer scenarioene gir relativt til Baseline. Siden sporstoffkomponentene beholder sin opprinnelse gjennom hele modellkjøringen, gir analysen et direkte mål på hvor stor del av innholdet i en boks som kan spores tilbake til ytre kilder, uten at fram- og tilbake-transport over boksgrenser feiltolkes som ny fornyelse.

3.4 Boksvi utskiftingstid (τ)

I denne rapporten brukes boksvi utskiftingstid, τ , som et sporstoffbasert mål på hvor raskt vannet i en definert modellboks fortynnes og erstattes. Formålet med beregningen er å etablere et sammenlignbart mål på utveksling mellom vannlag og delområder i fjorden, og størrelsen reflekterer dermed samlet horisontal og vertikal utveksling mellom bokser. Størrelsen gjelder dermed en geografisk avgrensning og et definert dybdelag, og beskriver hvor lenge vannet i akkurat denne boksen i gjennomsnitt blir værende før det erstattes. Boksene er definert ut fra lagdelingsstrukturen i fjorden, slik at de tilnærmevis representerer bestemte delområder og dybdelag, som for eksempel Bunnefjordens bunnlag. τ beskriver dermed utveksling mellom bokser, og verdien vil være avhengig av både boksinndelingen og periodevalget. Boksinndelingen følger geometri og dybde, mens naturens vannmasser følger tetthet og topografi og kan strekke seg på tvers av boksgrensene.

Boksvolumet påvirker også den absolutte verdien av boksvi utskiftingstid, fordi samme utveksling vil kunne gi ulik fortynningstid i bokser med forskjellig volum. De absolutte verdiene bør derfor tolkes i lys av boksens størrelse og avgrensning, mens hovedvekten i denne rapporten ligger på forskjellene mellom Baseline og scenarioene innenfor samme boksinndeling.

Det betyr at boksvi utskiftingstid i for eksempel Bot-boksen ikke automatisk er det samme som utskiftingstid for bunnvannsmassen. I perioder der Lmid og Bot i praksis tilhører samme vannmasse, vil vann som flytter seg mellom disse to boksene bli registrert som utskifting av Bot-boksen, selv om bunnvannsmassen i egentlig forstand ikke er fornyet av nytt, tyngre vann utenfra. Derfor tolkes τ i denne rapporten sammen med sporstoffsammensetning, som viser hvor vannet kommer fra, og indikatorene for vertikal blanding og stabilitet. Når boksvi utskiftingstid i Bot går ned samtidig som andelen ytre dypvann i Bot øker, peker det mot reell fornyelse av bunnvannet. Når τ går ned uten tydelig endring i sammensetning, er det mer sannsynlig at dette reflekterer omfordeling mellom lag innenfor samme vannmasse.

Boksvi utskiftingstid beregnes ved å følge hvor stor andel av merket vann som til enhver tid er igjen i boksen. La $M(t)$ være sporstoffmassen i boksen til tiden t , og definer den gjenværende fraksjonen som

$$f(t) = \frac{M(t)}{M(0)}$$

Størrelsen τ defineres da som arealet under $f(t)$ fra starttidspunktet t_0 til slutten av den analyserte perioden t_{end} :

$$\tau = \int_{t_0}^{t_{\text{end}}} f(t) dt$$

Vi bruker tidsstemplene $t_0, t_1, \dots, t_N$ for perioden $[t_0, t_N]$. Dette gir $N + 1$ tidspunkter og dermed N tidsintervaller $[t_i, t_{i+1}]$ med $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$. Derfor dekker summen $\sum_{i=0}^{N-1}$ hele modellperioden.

$$\tau = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{f(t_i) + f(t_{i+1})}{2} \Delta t_i$$

der $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$. Boksvi utskiftingstid får dermed enhet døgn, og kan tolkes som en integrert tidsskala for hvor raskt innholdet i boksen fortynnes og erstattes over perioden. Dette samsvarer med

hvordan størrelsen tidligere har vært beskrevet som arealet under kurven for gjenværende andel sporstoff.

En høy verdi av τ betyr at vannet i boksen skiftes ut langsomt, mens en lav verdi betyr raskere utskifting. Når tiltak eller scenarioer skal sammenlignes, beregnes τ for Baseline og for hvert scenario i samme boks, og forskjellen mellom dem brukes som et mål på hvordan utskiftingen påvirkes.

Metoden forutsetter at sporstoffet er passivt og konservativt, at det ikke tilføres nytt sporstoff i boksen etter starttidspunktet, og at modellen kjøres over en tilstrekkelig lang periode til at den merkede andelen avtar betydelig. Kort fortalt følger vi boksens eget sporstoff over tid, beregner $f(t)$, og summerer arealet under kurven. Det er denne integrerte størrelsen som rapporteres som bokstvis utskiftningsstid, τ .

I denne rapporten beregnes τ for de tre stagnasjonsperiodene, og resultatene presenteres både som tidsserier for hver periode og som gjennomsnitt over periodene.

Siden bokstvis utskiftningsstid beregnes som et integral over analyseperioden, vil den beregnede verdien være avhengig av valgt sluttidspunkt dersom den gjenværende sporstoffandelen ikke har gått mot null. Tallverdiene må derfor tolkes som periodeavhengige mål på fortynning og utveksling, ikke som absolutte og generelle oppholdstider for boksene. Sammenligningen mellom Baseline og scenarioene er likevel relevant fordi samme start- og sluttidspunkt brukes innenfor hver periode.

3.5 Vertikalblanding

Vannmassene i en fjord er vanligvis lagdelt: lettere, ferskere vann ligger øverst, mens tyngre og saltere vann ligger dypere. Denne lagdelingen bestemmer hvor effektivt oksygen, næringssalter og forurensninger kan bevege seg mellom lagene. Når lagdelingen er sterk, blir også den vertikale blandingen svak, og fjorden kan få områder som er isolert fra atmosfærisk innblanding eller utskifting på kortere tidsskalaer.

Vertikal blanding og stabilitet kvantifiseres her ved hjelp av vertikal turbulent diffusivitet, K_z [m^2/s], og Richardson-tallet, Ri [-]. K_z beskriver den faktiske vertikale utvekslingen mellom lag, mens Ri beskriver forholdet mellom stabiliserende lagdeling og destabiliserende skjær (skjær her forstått som vertikal hastighetsgradient mellom lag). Sammen gir de et mål på både hvor mye vertikal blanding som skjer, og hvor gunstige forholdene er for at slik blanding kan oppstå. Disse størrelsene brukes for å sammenligne blandingsforhold mellom Baseline og scenarioene.

For å få god romlig oppløsning deles Oslofjorden inn i fem delområder og fire vertikale lag ("top", "Umid", "Lmid", "bot"). Dette gir tre grenseflater: "top–Umid", "Umid–Lmid" og "Lmid–bot".

Begge nøkkelstørrelsene beregnes per grenseflate og som arealvektede felt per delområde. Dermed kan vi se både hvor i fjorden blanding skjer, og hvilket dyp som dominerer blandingsprosessen.

Disse størrelsene beregnes og analyseres som følger:

- Vertikal turbulent diffusivitet (K_z [m^2/s]), som uttrykker hvor effektivt turbulens jevner ut forskjeller mellom lag
 - Høy $K_z \rightarrow$ aktiv blanding.
 - Lav $K_z \rightarrow$ sterk lagdeling og liten vertikal utveksling.
- Richardson-tallet (Ri [-]) uttrykker forholdet mellom stabiliserende tetthetslagdeling og hastighetsforskjeller mellom lag som kan generere skjær og dermed gi grunnlag for turbulens
 - Høy $Ri \rightarrow$ stabil, lite blanding.
 - Lav $Ri \rightarrow$ stor hastighetsgradient mellom lag, noe som øker sannsynligheten for skjærindusert turbulens

3.5.1 Vertikal turbulent diffusivitet K_z

Vertikal turbulent diffusivitet K_z brukes her som et diagnostisk mål på hvor mye vertikal utveksling modellen faktisk produserer, uavhengig av hvilken mekanisme som driver turbulensen. I denne

sammenhengen er K_z spesielt nyttig fordi den kan fange opp konsekvensene av endringer på jetéen fra to hovedmekanismer:

1. Endret utveksling mellom indre fjord og ytre fjord
2. Endret lokal turbulens og blanding ved grenseflater mellom boksene

Praktisk tolkning i scenariovurdering:

- Økt K_z kan indikere mer effektiv vertikal utveksling i stagnasjonsperioder, og dermed bedre forutsetninger for effektiv fornyelse når dyppvannsinbrudd inntreffer.
- Økt K_z kun nær overflaten kan indikere mer overflateomrøring uten tilsvarende forbedring i dypet.
- Redusert K_z i mellom- og dypgrenseflater kan indikere økt isolasjon av bassengvann og større risiko for stagnasjon.

For hver boks har vi tidsserier for tracer-masse M og et budsjett som gir en residual. Konsentrasjonen i et lag beregnes som:

$$C = \frac{M}{V}$$

Modellbudsjettet gir en residual som tolkes som netto vertikal transport. For hver grenseflate etableres derfor en nedadrettet fluks per tidssteg, F_{down} .

Fluksen gjøres areal- og tidsuavhengig ved:

$$J = \frac{F_{\text{down}}}{A \Delta t}$$

Vi antar at den vertikale transporten kan beskrives med en diffusiv lov (Ficks lov):

$$J \approx -K_z \frac{\Delta C}{\Delta z} = -K_z \frac{C_{\text{up}} - C_{\text{lo}}}{\Delta z}$$

Her representerer C_{up} konsentrasjonen i sentrum (midten) av den øvre boksen, mens C_{lo} representerer konsentrasjonen i sentrum av den nedre boksen. Avstanden Δz er dermed den vertikale avstanden mellom midtpunktene i de to tilstøtende boksene.

Dette gir et direkte estimat av K_z som "helningen" mellom fluks og konsentrasjonsgradient. I praksis vil både fluksene og gradientene variere i tid og mellom ulike sporstoff, blant annet som følge av numerisk støy, småskalavariasjoner og forskjeller i signalstyrke. For å oppnå et robust og samlet estimat av den effektive vertikale diffusiviteten benyttes derfor et minste-kvadraters estimat som kombinerer informasjon fra alle sporstoff og tidspunkter.

Siden analysen inkluderer flere sporstoff (indeks i), beregnes K_z som et samlet minste-kvadraters estimat:

$$K_z = - \frac{\sum_{t,i} J(t,i) \frac{\Delta C}{\Delta z}(t,i)}{\sum_{t,i} \left(\frac{\Delta C(t,i)}{\Delta z(t,i)} \right)^2}$$

Tolkning av ledd:

- C : "konsentrasjon" i lag = M/V [sporstoff/ m^3]
- A er grenseflatearealet [m^2]
- V er lagvolumet [m^3]
- Δz er avstanden mellom lagmidtpunktene [m]
- F_{down} : netto vertikal sporstoff-transport over grenseflaten per tidssteg [sporstoff · m^3]

- Δt er tidssteget [s]
- J : areal- og tidsnormalisert vertikal tracer-fluks [sporstoff · m/s]
- $K_z = -J / \left(\frac{\Delta C}{\Delta z} \right)$ [m²/s]

3.5.2 Richardson-tallet

Richardson-tallet defineres som:

$$Ri = \frac{N^2}{S^2}.$$

Richardson-tallet uttrykker dermed forholdet mellom stabiliserende lagdeling (høy N^2) og indikator på skjærenergi tilgjengelig for turbulensproduksjon (høy S^2 , større potensial for turbulens).

Der K_z beskriver hvor mye blanding som faktisk skjer, brukes Richardson-tallet Ri til å vurdere om strømforholdene kan generere turbulens. Ri uttrykker forholdet mellom stabiliserende tetthetslagdeling (N^2) og hastighetsforskjeller mellom lag (S^2), som gir mekanisk (kinetisk) energi tilgjengelig for å produsere turbulens:

- Stabiliserende tetthetslagdeling, uttrykt gjennom opdrifts-kreftene i vannsøylen og kvantifisert ved Brunt–Väisälä-frekvensen i kvadrat (N^2),
- Destabiliserende turbulensdrivende hastighetsskjær (mekanisk energi) mellom lag, kvantifisert ved det kvadrerte skjærleddet S^2).

Her beregnes først Brunt–Väisälä-frekvensen i kvadrat (stratifisering):

$$N^2 = \frac{g}{\rho_{ref}} \frac{\Delta \rho}{\Delta z}$$

der ρ_{ref} er en referansetetthet, her beregnet som middelverdien av tettheten i laget over og laget under grenseflaten. N^2 beskriver styrken i den stabile tetthetslagdelingen. Dette kan forstås som en potensiell energibarriere mot vertikal bevegelse: jo større tetthetsforskjell per meter, desto mer energi kreves for å blande vannmassene på tvers av lagene.

Så beregnes skjærleddet:

$$S^2 = \left(\frac{\Delta u}{\Delta z} \right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\Delta z} \right)^2$$

S^2 er den kvadrerte vertikale hastighetsgradienten og kan tolkes som et mål på hvor stort potensialet er for skjærindusert turbulens og vertikal blanding.

Siden Ri gir et fysisk rammeverk for å forstå scenarieforskjellene:

- Hvis K_z øker og Ri samtidig synker, tyder det på at økt skjær driver turbulens (dynamisk konsistent respons).
- Hvis K_z endrer seg uten tilsvarende endring i Ri , kan blandingen være påvirket av andre prosesser (numerisk diffusjon, internbølger, eller endret vertikal transport via adveksjon/budsjettresidual).
- Hvis Ri øker (mer stabilitet) og K_z synker, er det konsistent med økt lagdeling/isolasjon i indre Oslofjord.

Det er viktig å være oppmerksom på at S og N her beregnes for store bokser, og verdiene kan derfor avvike fra lokale Ri -verdier som ofte refereres til i litteraturen.

I litteraturen brukes Munk-Anderson-relasjonen som et generelt rammeverk for å beskrive at vertikal blanding vanligvis avtar når stabiliteten i vannsøylen øker. En slik sammenheng kan uttrykkes som $K_z = K_{z0}(1 - aRi)^{-n}$. Her er K_{z0} er den turbulente diffusjon uten stabilitetseffekt, mens a og n er empiriske parametere, som er funnet ut fra mange studier i lagdelte vannmasser som bestemmer hvor sterkt diffusiviteten avtar med økende Ri . Relasjonen brukes her som en teoretisk referanse for å tolke sammenhengene mellom K_z og Ri , ikke som selve beregningsmetoden i analysen.

4 Resultater

Dette kapittelet presenterer resultatene fra sporstoffanalysen, dette inkluderer beregninger av dypvannsinnbrudd, boksvist utskiftningstid og indikatorer for vertikal blanding og stabilitet i indre Oslofjord. Denne avgrensningen gjør det mulig å skille mellom respons knyttet til selve innbruddshendelsen og respons knyttet til utviklingen i mer stagnasjonsforhold.

4.1 Dypvannsinnbrudd

Figur 4.1 gir en kvalitativ illustrasjon av utviklingen under Di3 og viser hvordan komponenten Ytre Oslofjorden Bot brer seg videre inn i systemet fra februar til juni.

Dypvannsinnbrudd analyseres her ved hjelp av sporstoff, med fokus på de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak (ytre vannmasser). Resultatene presenteres for Umid, Lmid og Bot i Vestfjorden og Bunnefjorden. Figur 4.2 - Figur 4.7 viser tidsutviklingen gjennom de tre dypvannsinnbruddsperiodene Di1, Di2 og Di3, mens Tabell 4.1 oppsummerer månedsmiddelverdier for bunnlaget (Bot) i de samme periodene.

Figur 4.2 viser at Baseline i Vestfjorden har et gjennomgående høyt bidrag fra de sammenslåtte ytre komponentene i Lmid og Bot gjennom alle tre periodene, mens Umid er mer variabel. I Di1 ligger andelen i Vestfjorden Bot på om lag 91–95 % fra februar til juni, før den gradvis avtar til rundt 82 % i desember, se Tabell 4.1. I Di2 er nivået høyt fra april til juni (om lag 84–89 %), lavere i sensommeren og tidlig høst, og høyere igjen utover høsten, se Tabell 4.1. I Di3 øker andelen raskt fra 11 % i februar til rundt 89–94 % i mars–juni, før den gradvis avtar mot høsten, se Tabell 4.1. Samlet viser dette at Vestfjorden allerede i Baseline har sterk påvirkning fra ytre vannmasser i de dypere lagene. Toppnivået under selve dypvannsinnbruddet i Vestfjorden Bot ligger på om lag 93 % i Di1, 91 % i Di2 og 92 % i Di3. Dette viser at innbruddssignalet i Vestfjorden raskt gir en høy andel ytre vannmasser i bunnlaget i alle tre perioder.

Figur 4.3 og Figur 4.4 viser at scenarioeffektene i Vestfjorden i hovedsak ligger innenfor noen få prosentpoeng og varierer mer mellom perioder og lag enn i Bunnefjorden. I Scenario 1 er avvikene i Vestfjorden Bot stort sett positive relativt til Baseline og vanligvis rundt 1–2 prosentpoeng. I Scenario 2 er responsen mer variabel, med avvik relativt til Baseline som i flere perioder spenner fra svakt negative verdier tidlig i forløpet til positive avvik på om lag 2–5 prosentpoeng senere i perioden. De tidlige negative avvikene kan tyde på at signalet fra ytre vannmasser i enkelte perioder etableres noe senere i scenarioene enn i Baseline, før andelen senere blir høyere enn i Baseline utover perioden. Toppnivået under selve dypvannsinnbruddet i Vestfjorden Bot ligger i Scenario 1 på om lag 94 % i Di1, 93 % i Di2 og 93 % i Di3, mens tilsvarende nivå i Scenario 2 er om lag 93 % i Di1, 92 % i Di2 og 92 % i Di3. Sammenlignet med Baseline viser dette at Scenario 1 gir en liten økning i toppnivået i Vestfjorden, mens Scenario 2 ligger svært nær Baseline.

Figur 4.5 viser at Baseline i Bunnefjorden har et tydeligere og mer gradvis utviklet signal av sammenslåtte ytre komponenter enn i Vestfjorden, særlig i Lmid og Bot. I Di1 øker Bunnefjorden Bot fra 0 % i januar til 60 % i mars og videre til rundt 72–78 % fra mai til desember, se Tabell 4.1. I Di2 øker andelen fra 0 % i mars til 17 % i april og stabiliserer seg deretter rundt 31–39 % gjennom resten av året, se Tabell 4.1. I Di3 øker andelen fra 0 % i februar til 21 % i mars, 40 % i april og videre til om lag 66–69 % fra juni og utover, se Tabell 4.1. Figurene viser samtidig at Umid i flere tilfeller ligger lavere enn Lmid og Bot tidlig i periodene, særlig i Di2 og tidlig i Di3, men at forskjellen mellom lagene avtar utover i perioden. Mot slutten av periodene kan Umid i Baseline nå samme nivå som, eller ligge høyere enn, Lmid og Bot. Dette kan tolkes som at de første og sterkeste innbruddene setter det tydeligste signalet i de dypere lagene, mens Umid i større grad reflekterer den videre utviklingen gjennom perioden. En mulig forklaring er at senere og svakere tilførsler av ytre vannmasser i større grad påvirker Umid enn de dypeste lagene. Toppnivået under selve dypvannsinnbruddet i Bunnefjorden Bot ligger på

om lag 78 % i Di1, 41 % i Di2 og 71 % i Di3. Dette viser at innbruddssignalet er svakere i Bunnefjorden enn i Vestfjorden i alle tre perioder, og at forskjellen er størst i Di2.

I Baseline etableres signalet fra ytre vannmasser tidligere i Vestfjorden enn i Bunnefjorden. For alle tre dypvannsinnbruddsperiodene fremstår dette som en forsinkelse på om lag to måneder fra signalet er tydelig etablert i Vestfjorden til det er tydelig etablert også i Bunnefjorden.

Figur 4.6 og Figur 4.7 viser at scenarioeffekten i Bunnefjorden er størst i Scenario 2 og fremstår som en tydelig og vedvarende økning i andelen ytre vannmasser. I Di1 er økningen i Bunnefjorden Bot moderat, typisk rundt 2–3 prosentpoeng fra våren og utover. I Di2 er effekten klart sterkere: fra mai til desember ligger Scenario 2 omtrent 9–10 prosentpoeng over Baseline i Bunnefjorden Bot. I Di3 er økningen også tydelig og vedvarende, vanligvis rundt 6–7 prosentpoeng fra april og utover, se Tabell 4.1. Scenario 1 viser samme retning, men med klart mindre utslag; etter de første månedene ligger avvikene i hovedsak rundt 1–2 prosentpoeng. Toppnivået under selve dypvannsinnbruddet i Bunnefjorden Bot ligger i Scenario 1 på om lag 79 % i Di1, 44 % i Di2 og 73 % i Di3, mens tilsvarende nivå i Scenario 2 er om lag 80 % i Di1, 52 % i Di2 og 77 % i Di3. Sammenlignet med Baseline viser dette at begge scenarioene gir høyere toppnivå i Bunnefjorden, og at økningen er klart størst i Scenario 2. Dette viser at Bunnefjorden er bassenget der scenarioeffekten er tydeligst, ved at avvikene gjennomgående er større og holder seg positive gjennom større deler av periodene enn i Vestfjorden.

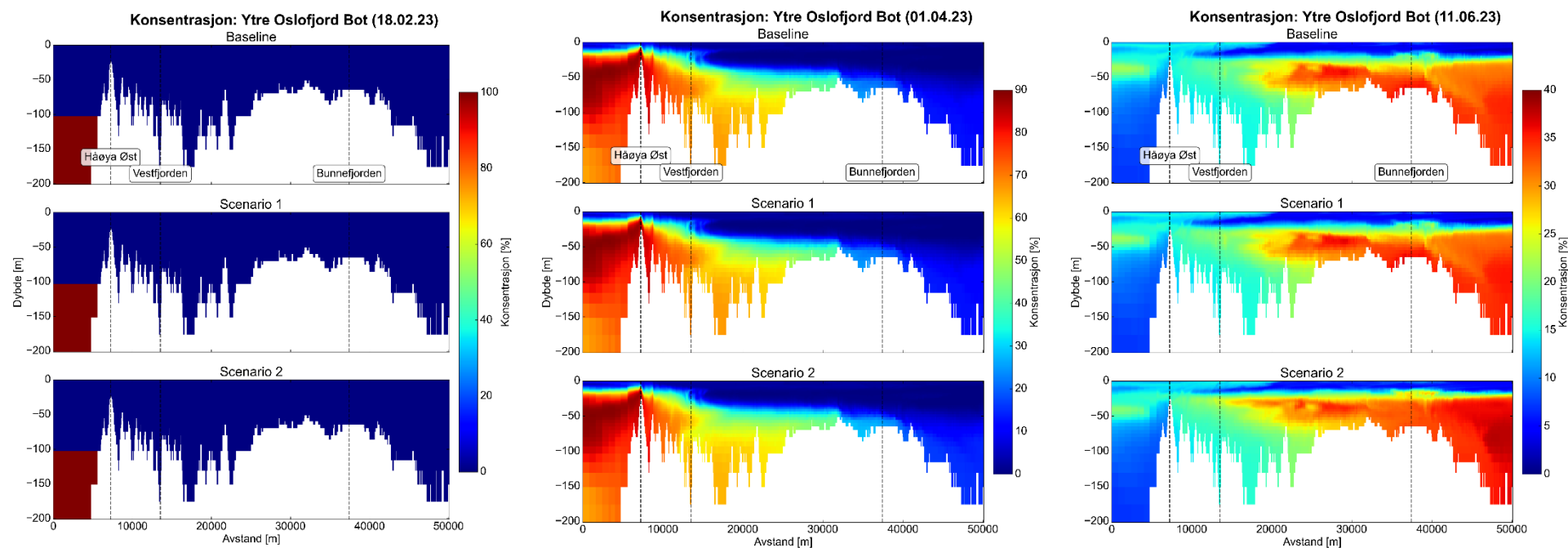
Når Vestfjorden og Bunnefjorden sammenlignes, er hovedbildet at Vestfjorden har høy ytre påvirkning allerede i Baseline, mens scenarioene først og fremst gir mindre omfordelinger rundt dette nivået. I Bunnefjorden er ytre påvirkning lavere i Baseline eller etableres senere, og scenarioene, særlig Scenario 2, viser en tydeligere netto økning i andelen ytre vannmasser. Ved å vise de sammenslåtte ytre komponentene for Umid, Lmid og Bot blir hovedmønsteret tydeligere, fordi variasjon mellom enkeltkomponenter i mindre grad dominerer framstillingen.

Dette innebærer ikke nødvendigvis at scenarioene gir mindre transport av ytre vannmasser gjennom Vestfjorden. Siden Vestfjorden allerede har høy andel ytre vannmasser i Baseline, kan økt gjennomstrømning i scenarioene i større grad komme til uttrykk som økt andel ytre vannmasser videre inn i Bunnefjorden enn som et høyere toppnivå i Vestfjorden.

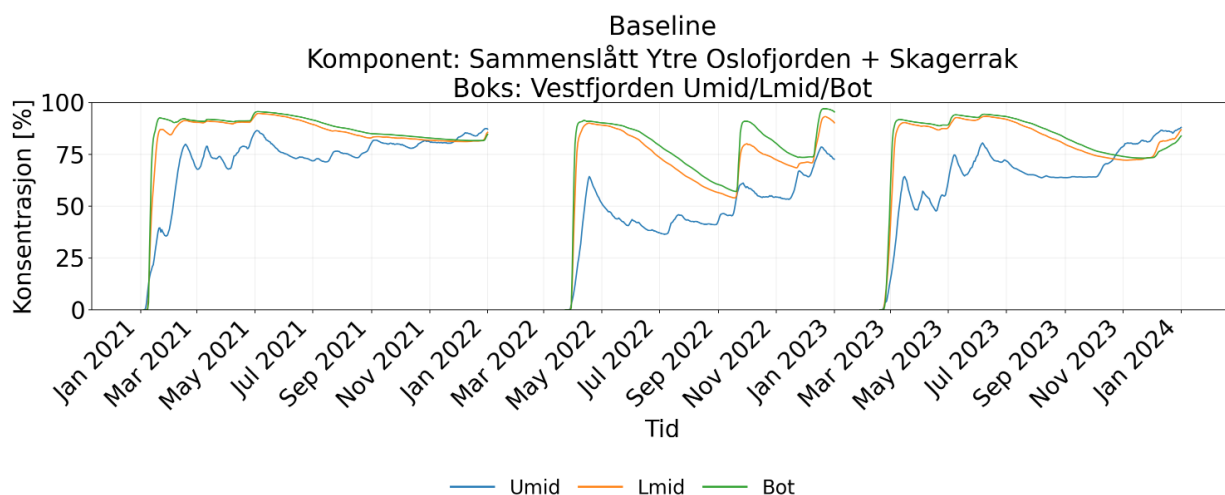
Figur 4.2 og Figur 4.5 viser også at responsen varierer mellom de tre lagene, og at dette ikke er helt likt i Vestfjorden og Bunnefjorden i Baseline. I Vestfjorden er andelen av de sammenslåtte ytre komponentene høy i de dypere lagene allerede i Baseline, og Umid fremstår derfor først og fremst som mer variabel enn Lmid og Bot. I Bunnefjorden er lagdelingen tydeligere i starten av periodene, ved at Umid ofte viser et svakere signal enn Lmid og Bot, mens forskjellen mellom lagene blir mindre utover i perioden. Dette tilsier at dypvannsinnbruddene først setter et tydelig signal i de dypere lagene, men at utviklingen senere i perioden ikke nødvendigvis er sterkest i Bot. I Vestfjorden er mønsteret mindre markert, fordi høy ytre påvirkning allerede preger alle de tre analyserte lagene i større grad.

Resultatene for dypvannsinnbrudd kan oppsummeres slik:

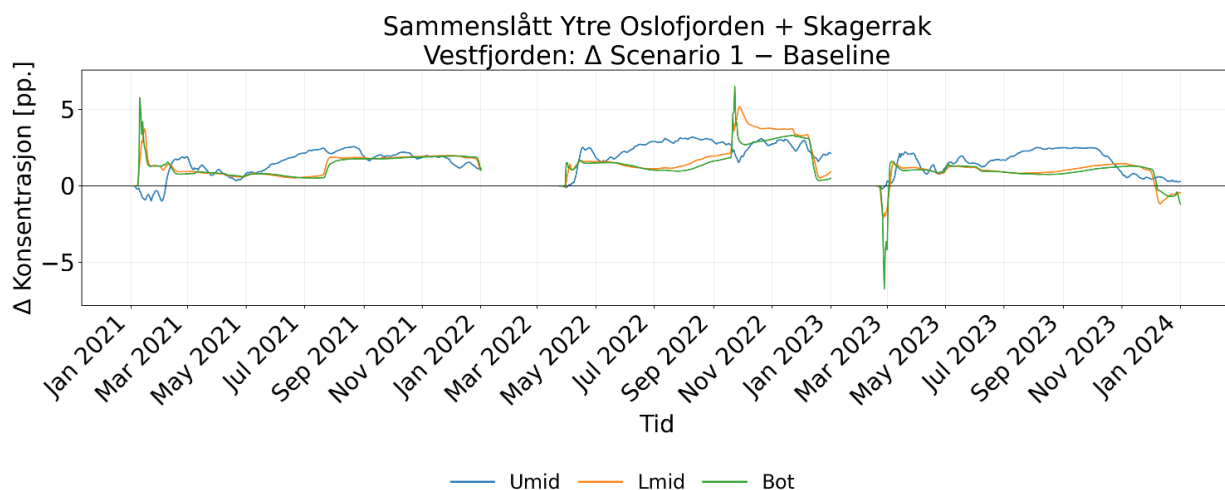
- I Vestfjorden er andelen ytre vannmasser høy allerede i Baseline, særlig i Lmid og Bot i periodene etter dypvannsinnbrudd. Sporstoffresultatene viser at scenarioene hovedsakelig gir mindre omfordelinger rundt dette høye nivået, snarere enn et tydelig skifte i sammensetning av vannmassene.
- I Bunnefjorden er andelen ytre vannmasser lavere i Baseline i periodene etter innbrudd. Scenarioene gir derfor et tydeligere utslag her enn i Vestfjorden, ved at andelen ytre vannmasser øker i større deler av periodene enn i Baseline.
- Scenario 2 gir gjennomgående større endringer enn Scenario 1, særlig i Bunnefjorden, og viser at tiltaket i større grad endrer hvor mye av det ytre vannet som faktisk preger Bunnefjorden over tid.



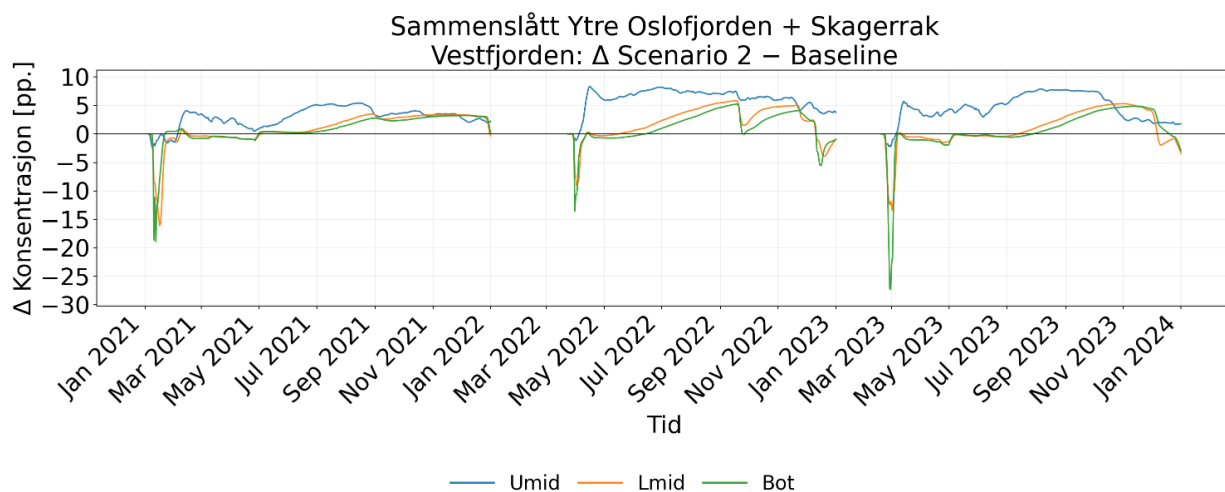
Figur 4.1 Profilen fra tverrsnittet vist i Figur 3.1, her ser en dypvannsinbruddet sin utvikling i modellen for Baseline, Scenario 1 og Scenario 2 på tre utvalgte datoer i 2023 (18.02.23 (startdato), 01.04.23 (etter halvannen måned) og 11.06.23 (etter i underkant av fire måneder)). Konsentrasjonen i % er vist med fargeskalaen til høyre for hver av figurene, merk at fargeskalaen er forskjellig på de forskjellige tidspunktene.



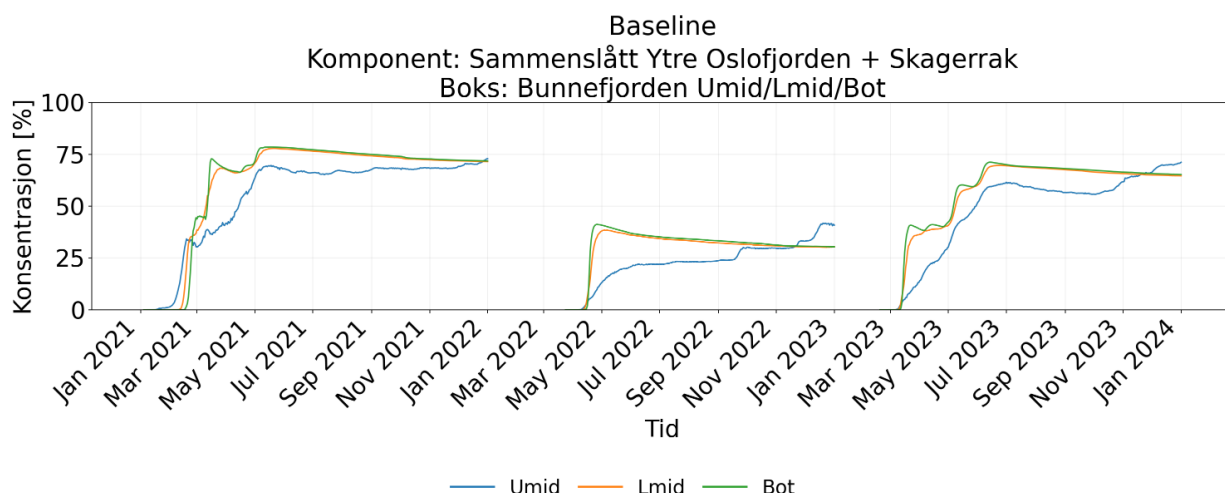
Figur 4.2 Massen av de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak i prosent av boksene Umid/Lmid/Bot Vestfjorden for Baseline. Her er alle de tre dypvannsinnbruddsperiodene inkludert i samme figur.



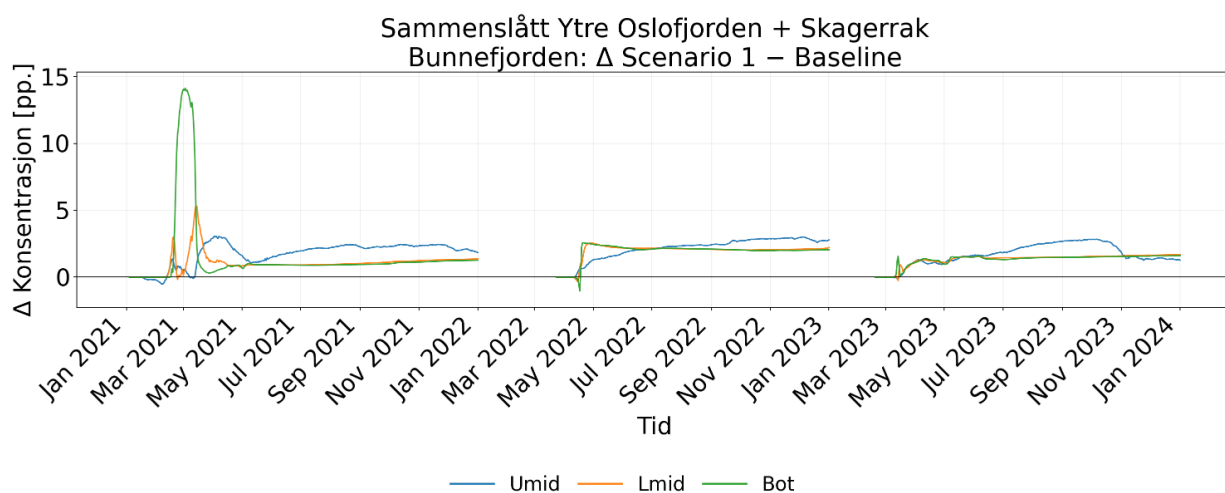
Figur 4.3 Endring i massen av de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak, uttrykt i prosentpoeng, i boksene Umid/Lmid/Bot i Vestfjorden for Scenario 1 minus Baseline. Her er alle de tre dypvannsinnbruddsperiodene inkludert i samme figur.



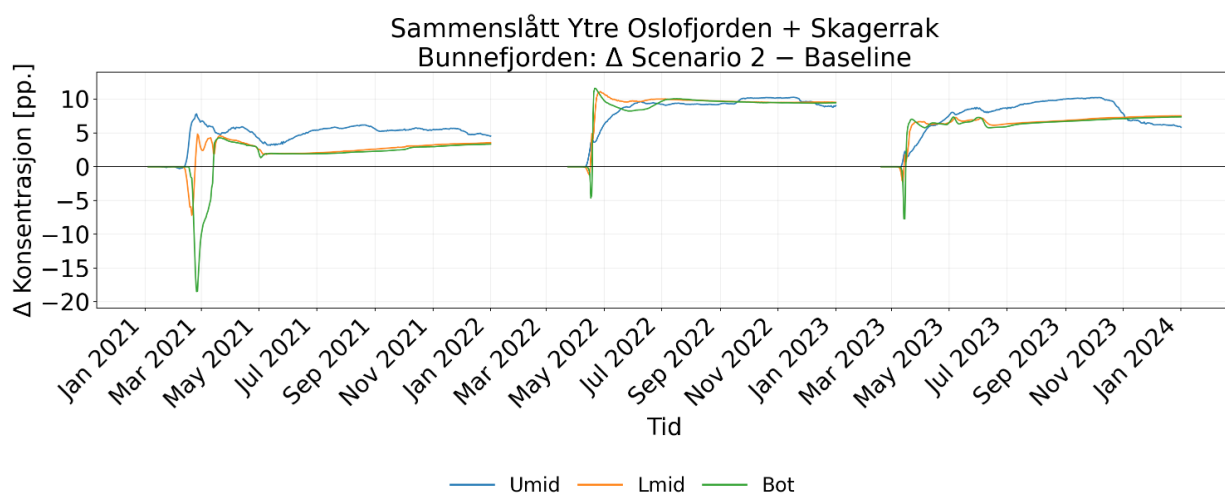
Figur 4.4 Endring i massen av de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak, uttrykt i prosentpoeng, i boksene Umid/Lmid/Bot i Vestfjorden for Scenario 2 minus Baseline. Her er alle de tre dypvannsinnbruddsperiodene inkludert i samme figur.



Figur 4.5 Massen av de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak i prosent av boksene Umid/Lmid/Bot Bunnefjorden for Baseline. Her er alle de tre dypvannsinnsbruddsperiodene inkludert i samme figur.



Figur 4.6 Endring i massen av de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak, uttrykt i prosentpoeng, i boksene Umid/Lmid/Bot i Bunnefjorden for Scenario 1 minus Baseline. Her er alle de tre dypvannsinnsbruddsperiodene inkludert i samme figur.



Figur 4.7 Endring i massen av de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak, uttrykt i prosentpoeng, i boksene Umid/Lmid/Bot i Bunnefjorden for Scenario 2 minus Baseline. Her er alle de tre dypvannsinnsbruddsperiodene inkludert i samme figur.

Tabell 4.1 Konsentrasjonene av de sammenslåtte komponentene Ytre Oslofjorden + Skagerrak sporstoff i prosent som er i «boksen» for Vestfjorden og Bunnefjorden Bot i gjennomsnitt pr. måned, i de forskjellige dypvannsinnsbruddsperiodene Di1, Di2 og Di3. Rød farge viser økt andel ytre komponent, mens blått viser minket andel ytre komponent.

	Di1 Vestfjorden Bot (2021)			Di1 Bunnefjorden Bot (2021)			Di2 Vestfjorden Bot (2022)			Di2 Bunnefjorden Bot (2022)			Di3 Vestfjorden Bot (2023)			Di3 Bunnefjorden Bot (2023)		
	Baseline	$\Delta(S1-B)$	$\Delta(S2-B)$	Baseline	$\Delta(S1-B)$	$\Delta(S2-B)$	Baseline	$\Delta(S1-B)$	$\Delta(S2-B)$	Baseline	$\Delta(S1-B)$	$\Delta(S2-B)$	Baseline	$\Delta(S1-B)$	$\Delta(S2-B)$	Baseline	$\Delta(S1-B)$	$\Delta(S2-B)$
Januar	66.3	1.7	-3.7	0.0	0.0	0.0												
Februar	91.4	1.1	-0.1	9.5	3.5	-4.4							11.2	-1.9	-8.4	0.0	0.0	0.0
Mars	91.4	0.9	-0.6	60.0	6.0	-0.6	2.3	0.2	-1.8	0.0	0.0	0.0	88.8	0.9	-2.7	21.0	0.5	2.5
April	91.3	0.7	-0.8	68.0	0.7	3.3	87.7	1.4	-1.8	16.5	1.0	3.9	89.5	1.0	-1.4	40.1	1.2	6.2
Mai	95.2	0.8	0.4	77.8	0.9	1.9	89.2	1.5	-0.6	38.9	2.3	8.8	93.1	1.3	-0.3	56.4	1.4	6.8
Juni	93.1	0.6	0.2	77.8	0.9	1.9	84.0	1.2	0.2	36.0	2.1	8.8	93.8	1.0	-0.3	69.2	1.4	6.1
Juli	89.6	0.7	0.8	76.7	0.9	2.0	74.5	1.0	1.9	34.6	2.1	10.0	91.4	0.8	-0.3	69.3	1.4	6.3
August	86.4	1.7	2.2	75.5	0.9	2.2	64.6	1.3	3.7	33.8	2.1	9.8	86.3	0.8	0.9	68.6	1.5	6.6
September	84.6	1.8	2.5	74.5	1.0	2.4	66.8	2.5	3.6	32.8	2.1	9.6	80.0	0.9	2.9	67.8	1.5	6.8
Oktober	83.5	1.8	2.7	73.2	1.1	2.8	85.9	2.9	2.1	31.9	2.0	9.5	75.4	1.2	4.4	66.9	1.5	7.0
November	82.4	1.9	3.2	72.5	1.2	3.1	75.8	3.2	3.7	30.9	2.0	9.5	73.4	1.2	4.8	66.1	1.6	7.2
Desember	81.9	1.9	3.0	72.0	1.2	3.3	87.2	1.5	-0.9	30.6	2.0	9.4	78.1	-0.3	0.7	65.5	1.6	7.3

4.2 Boksvi utskiftningstid (τ)

Boksvi utskiftningstid i Baseline og endringer i scenarioene presenteres her med fargeskalakart. Figur 4.8, beregnet over de tre stagnasjonsperiodene, mens Figur 4.9 viser endringen i scenarioene relativt til Baseline. Tidsserier for utviklingen i Bunnefjorden og Vestfjorden i de tre stagnasjonsperiodene er samlet i Vedlegg A.2.

Figur 4.8 viser at boksvi utskiftningstid er lengst i Bunnefjorden og Vestfjorden, mens verdiene er lavere i områdene rundt Håøya. I Bunnefjorden er utskiftningstiden for eksempel om lag 82 dager i Umid, mens Bot ligger rundt 37–39 dager. Dette viser at de dypeste boksene ikke nødvendigvis har lengst boksvi utskiftningstid. Forklaringen er at boksvi utskiftningstid beregnes for en definert modellboks, og derfor påvirkes av hvor store konsentrasjonsforskjellene er mot naboboksene og hvor raskt sporstoff kan fortynnes gjennom utveksling mellom lag og områder. Når gradientene mellom Bot og overliggende boks er store, kan sporstoffinnholdet i Bot-boksen reduseres relativt raskt, selv om dette ikke nødvendigvis betyr at hele bunnvannsmassen fornyes av nytt vann utenfra. Resultatene må derfor tolkes som boksvise tidsskalaer for fortynning og utveksling, ikke som direkte utskiftningstid for hele bassengvannet.

Figur 4.9 viser et tydelig geografisk mønster i scenarioresponsen. I de indre bassengene, Bunnefjorden og Vestfjorden, er endringene i boksvi utskiftningstid små, med reduksjoner på rundt 2 % i Vestfjordens bunnlag og om lag 2 % i Scenario 1 og 5 % i Scenario 2 i Bunnefjordens bunnlag, mens responsen i terskelnære områder rundt Håøya er klart større og går i motsatt retning på vest- og østsiden.

I Bunnefjorden reduseres boksvi utskiftningstid i alle lag, Top, Umid, Lmid og Bot, i begge scenarioer. Endringene er små i de indre bassengene, men går gjennomgående i samme retning i alle tre stagnasjonsperioder. I Bunnefjordens bunnlag er reduksjonen om lag 2 % i Scenario 1 og om lag 5 % i Scenario 2, mens de største prosentvise reduksjonene i Bunnefjorden opptrer i de øvre lagene. Dette viser at også de dypere lagene får kortere boksvi utskiftningstid, men at effekten er tydeligst i Top og Umid.

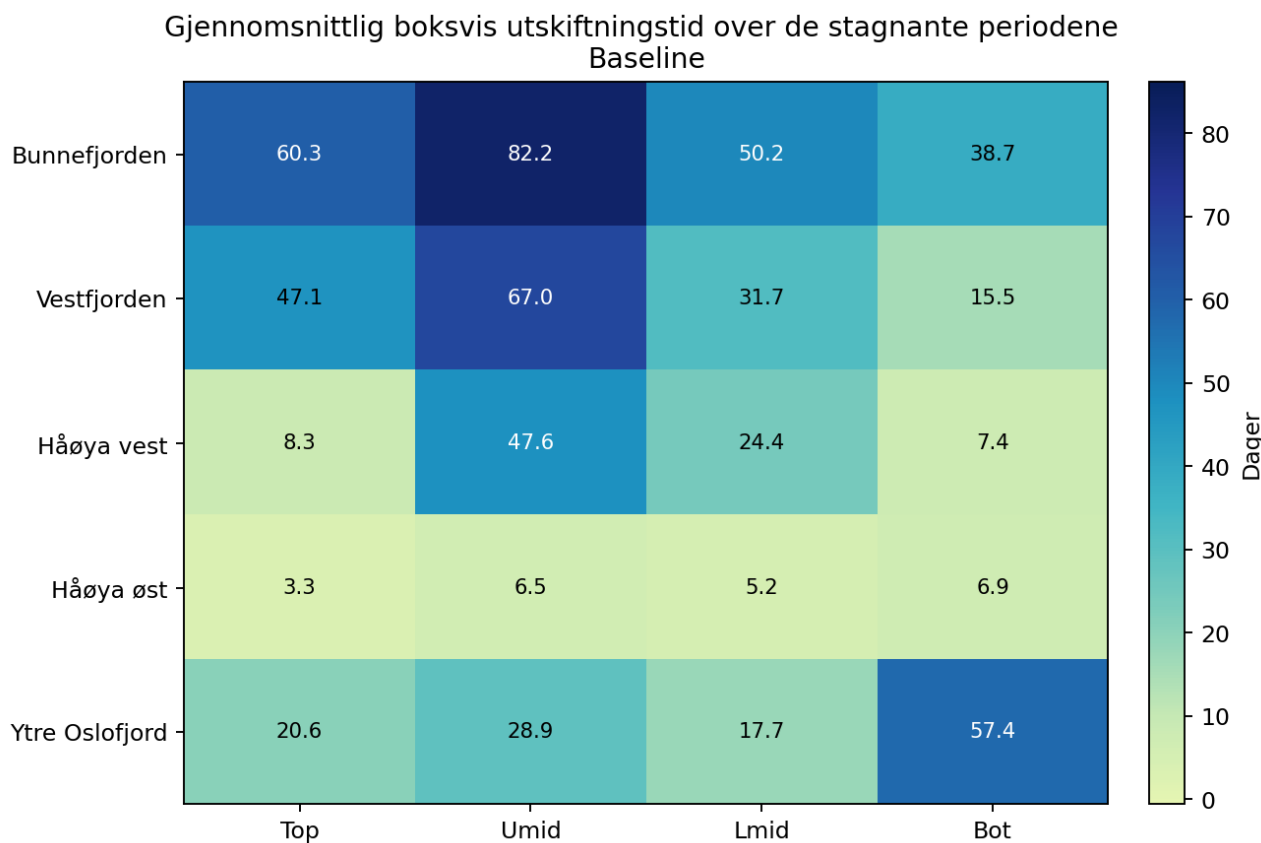
I Vestfjorden er bildet mer nyansert mellom lagene. Flere lag viser små prosentvise reduksjoner, mens Umid viser en svak økning i begge scenarioer. I bunnlaget er reduksjonen rundt 2 % i begge scenarioer. Samlet betyr dette at scenarioeffekten i Vestfjorden er liten, og at endringene varierer mer mellom lagene enn i Bunnefjorden.

Rundt Håøya er responsen langt sterkere og går i motsatt retning på vest- og østsiden, noe som er i tråd med at åpningen ved Håøya vest introduserer en alternativ transportvei og endrer fordelingen av gjennomstrømning rundt øya. På vestsiden reduseres boksvi utskiftningstid markant i begge scenarioer, tydeligst i Umid, der reduksjonen er om lag 18 % i Scenario 1 og om lag 52 % i Scenario 2. På østsiden opptrer motsatt respons, med en svak økning i boksvi utskiftningstid, størst i Umid, på om lag 15 % i Scenario 1 og om lag 31 % i Scenario 2.

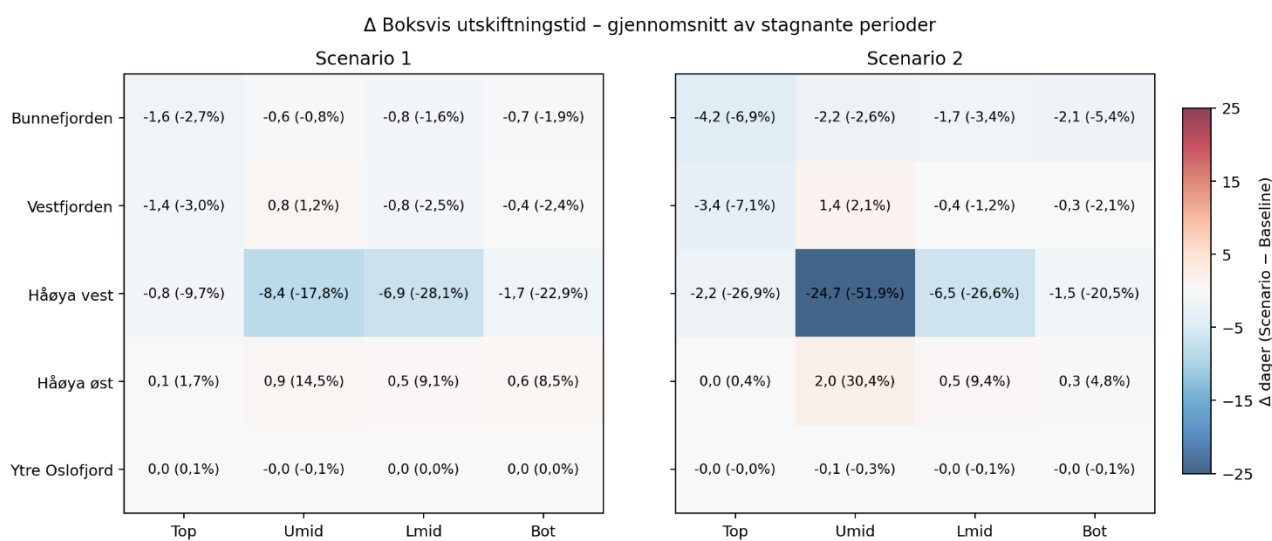
Resultatene for boksvi utskiftningstid kan oppsummeres i tre hovedtrekk. Her betyr kortere boksvi utskiftningstid enn i Baseline en positiv endring, fordi vannet i boksen fortynnes og erstattes raskere, mens lengre boksvi utskiftningstid enn i Baseline betyr en negativ endring.

- I Bunnefjorden er endringene gjennomgående positive, med kortere boksvi utskiftningstid i alle lag i begge scenarioer. Effekten er tydeligst i de øvre lagene, men også de dypere lagene viser kortere boksvi utskiftningstid enn i Baseline.
- I Vestfjorden er responsen mer nyansert mellom lagene. Flere lag viser kortere boksvi utskiftningstid enn i Baseline, men Umid skiller seg ut med en svak økning i begge scenarioer, det vil si en negativ endring sammenlignet med Baseline.
- De største endringene opptrer rundt Håøya og går i motsatt retning på vest- og østsiden. På vestsiden er endringen positiv, med klart kortere boksvi utskiftningstid, mens østsiden viser

motsatt respons med lengre boksvs utskiftningstid enn i Baseline. Scenario 2 gir gjennomgående størst utslag.



Figur 4.8 Gjennomsnittlig boksvs utskiftningstid i Baseline, beregnet over de tre stagnasjonsperiodene.



Figur 4.9 Endring i gjennomsnittlig boksvs utskiftningstid i scenarioene relativt til Baseline, beregnet over de tre stagnasjonsperiodene. Positive verdier viser økt boksvs utskiftningstid i scenarioet, mens negative verdier viser redusert boksvs utskiftningstid.

4.3 Vertikalblanding

Vertikalblandingen i fjorden beskrives her ved hjelp av både vertikal turbulent diffusivitet K_z og Richardson-tallet. Disse to størrelsene gir komplementær informasjon om henholdsvis den faktiske vertikale blandingen og forholdet mellom lagdeling og skjær som bestemmer hvor lett slik blanding kan oppstå.

4.3.1 Vertikal turbulent diffusivitet K_z

Resultatene for vertikal turbulent diffusivitet, K_z , presenteres som gjennomsnitt over de tre stagnasjonsperiodene. Baseline er vist som absolutte nivåer for grenseflatene Top–Umid, Umid–Lmid og Lmid–Bot i Figur 4.10, mens scenarioene er vist som forskjeller relativt til Baseline i Figur 4.11. For å gjøre figurene lettere å lese er K_z her multiplisert med 100 000. En figurverdi på 4 tilsvarer dermed $4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. I differansefiguren betyr positive verdier at K_z er høyere i scenarioet enn i Baseline, mens negative verdier betyr lavere K_z .

Figur 4.10 viser at K_z i Bunnefjorden og Vestfjorden er lavest over grenseflaten Top–Umid og høyere over de dypere grenseflatene. Dette betyr at den vertikale utvekslingen i de indre bassengene er svakest mellom overflatelaget og det øvre mellomlaget, mens utvekslingen er større mellom de dypere lagene. Rundt Håøya og i Ytre Oslofjord er K_z gjennomgående høyere enn i de indre bassengene, noe som viser at den vertikale utvekslingen er sterkere i de terskelnære områdene. Samlet peker dette på at blandingen er svakest i de øvre lagene i Bunnefjorden og Vestfjorden, og sterkere både dypere i bassengene og nærmere terskelområdet.

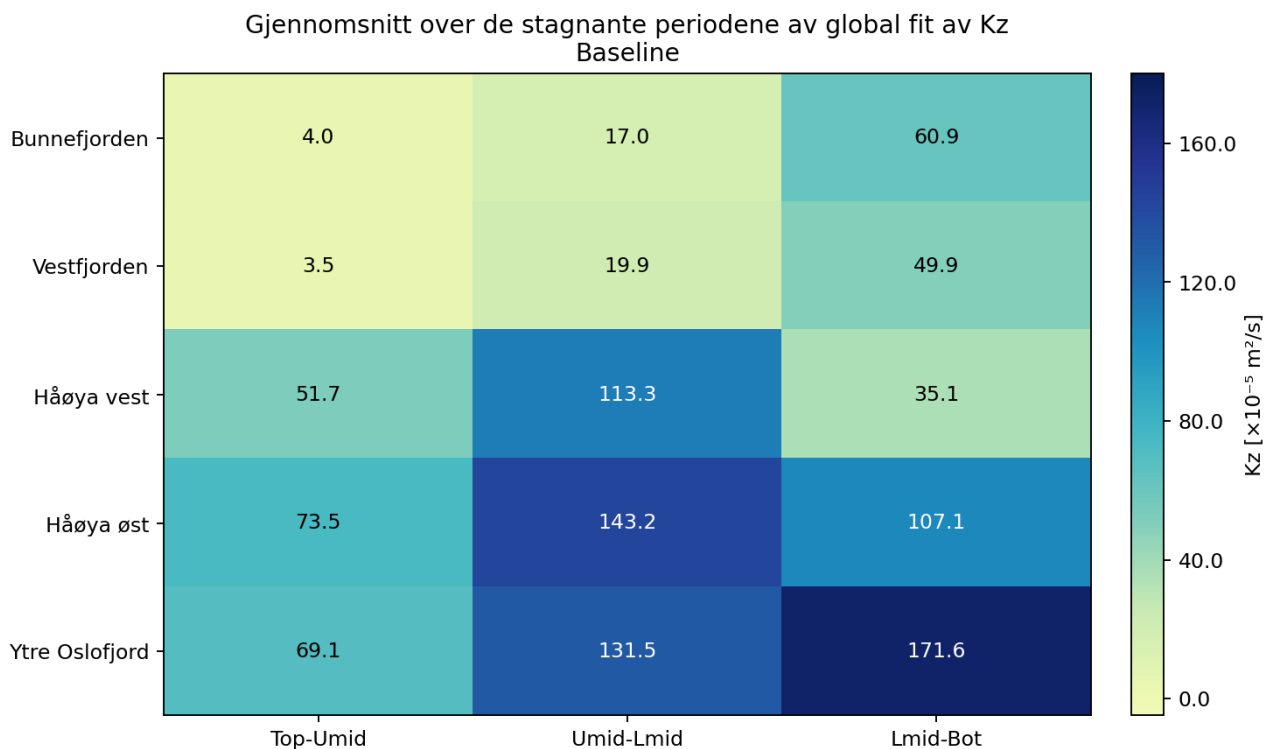
Figur 4.11 viser at scenarioendringene i Bunnefjorden gjennomgående går i retning av høyere K_z , men at endringene i de indre bassengene er små. I Scenario 1 øker K_z med om lag 2 % over Top–Umid, 5 % over Umid–Lmid og 2 % over Lmid–Bot, mens de tilsvarende økningene i Scenario 2 er om lag 6 %, 12 % og 5 %. I Vestfjorden er endringene også små, men mer varierende mellom grenseflatene. Over Top–Umid er K_z om lag 0 % i Scenario 1 og -3 % i Scenario 2, mens Umid–Lmid endres med om lag 1 % i Scenario 1 og 2 % i Scenario 2, og Lmid–Bot med om lag 5 % i Scenario 1 og 4 % i Scenario 2. Samlet viser dette at scenarioene gir små endringer i den beregnede vertikale utvekslingen i de indre bassengene, og at økningen er tydeligst i Bunnefjorden i Scenario 2.

Rundt Håøya er endringene langt større. Ved Håøya vest reduseres K_z kraftig over de to øvre grenseflatene i begge scenarioer, med reduksjoner på om lag 76 % i begge grenseflatene i Scenario 1 og om lag 56 % og 82 % i Scenario 2. Over Lmid–Bot er endringen liten i Scenario 1, mens Scenario 2 viser en tydelig økning på om lag 83 %. Ved Håøya øst reduseres K_z over alle tre grenseflater i begge scenarioer, med reduksjoner på om lag 61 %, 30 % og 72 % i Scenario 1 og om lag 36 %, 31 % og 38 % i Scenario 2. Dette viser at tiltaket gir store endringer i hvordan den vertikale utvekslingen fordeles rundt Håøya, og at responsen er tydelig forskjellig på vest- og østsiden.

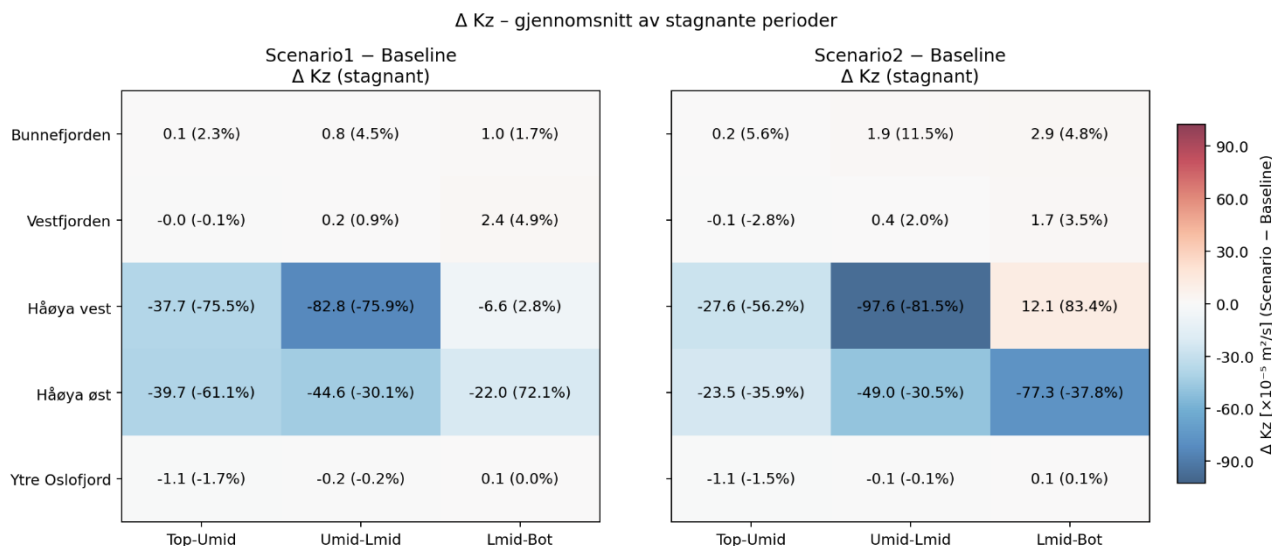
Resultatene for K_z kan oppsummeres i tre hovedtrekk. I Figur 4.11 betyr høyere K_z enn i Baseline en positiv endring, fordi den beregnede vertikale utvekslingen er større, mens lavere K_z enn i Baseline betyr en negativ endring.

- I Bunnefjorden er K_z lavest over grenseflaten Top–Umid og høyere over de dypere grenseflatene. Scenarioendringene går gjennomgående i positiv retning over alle grenseflater, og er tydeligst i Scenario 2.
- I Vestfjorden er K_z også lavest over Top–Umid og høyere over de dypere grenseflatene, men scenarioresponsen er mer variabel enn i Bunnefjorden. Over Top–Umid er endringen tilnærmet null eller svakt negativ, mens de dypere grenseflatene viser svake positive endringer.
- Rundt Håøya er endringene klart større enn i de indre bassengene og går i ulik retning mellom vest- og østsiden. Ved Håøya vest er endringene over de øvre grenseflatene i hovedsak negative, mens Lmid–Bot skiller seg ut med en positiv endring i Scenario 2. Ved Håøya øst er endringene negative over alle tre grenseflater. Dette viser at tiltaket først og fremst endrer den

lokale fordelingen av vertikal utveksling i terskelnære områder, mens effekten i de indre bassengene er mindre.



Figur 4.10 Gjennomsnittlig vertikal turbulent diffusivitet, K_z , i Baseline, beregnet over de tre stagnasjonsperiodene. For lesbarhet er K_z multiplisert med 100 000, slik at tallene i figuren tilsvarer $K_z \cdot 10^5 \text{ [m}^2/\text{s]}$.



Figur 4.11 Endring i gjennomsnittlig vertikal turbulent diffusivitet, K_z , i scenarioene relativt til Baseline, beregnet over de tre stagnasjonsperiodene. For lesbarhet er også differansene multiplisert med 100 000. Tallene i parentes viser prosentvis endring relativt til Baseline.

4.3.2 Richardson-tallet

Richardson-tallet, Ri , presenteres som gjennomsnitt over de tre stagnasjonsperiodene. Baseline er vist som absolutte nivåer for grenseflatene Top–Umid, Umid–Lmid og Lmid–Bot i Figur 4.12, mens scenarioene er vist som forskjeller relativt til Baseline i Figur 4.13. I differansefiguren betyr positive verdier at Ri er høyere i scenarioet enn i Baseline, altså at vannkolonnen er mer stabil over den aktuelle grenseflaten. Negative verdier betyr tilsvarende lavere Ri , og dermed redusert stabilitet.

Figur 4.12 viser at Ri i Bunnefjorden og Vestfjorden er høyest over de øvre grenseflatene og lavere over Lmid–Bot. Dette betyr at stabiliteten er størst mellom overflatelaget og de underliggende lagene, mens forholdet mellom lagdeling og skjær er annerledes nær bunnen. Rundt Håøya varierer både nivået og den vertikale fordelingen av Ri tydeligere mellom områdene. Ved Håøya vest er Ri høyest over de øvre grenseflatene og lavest over Lmid–Bot, mens Håøya øst skiller seg ut ved å ha relativt høy Ri over Lmid–Bot. Samlet viser dette at både stabilitetsnivå og vertikal struktur varierer tydelig mellom de indre bassengene og de terskelnære områdene.

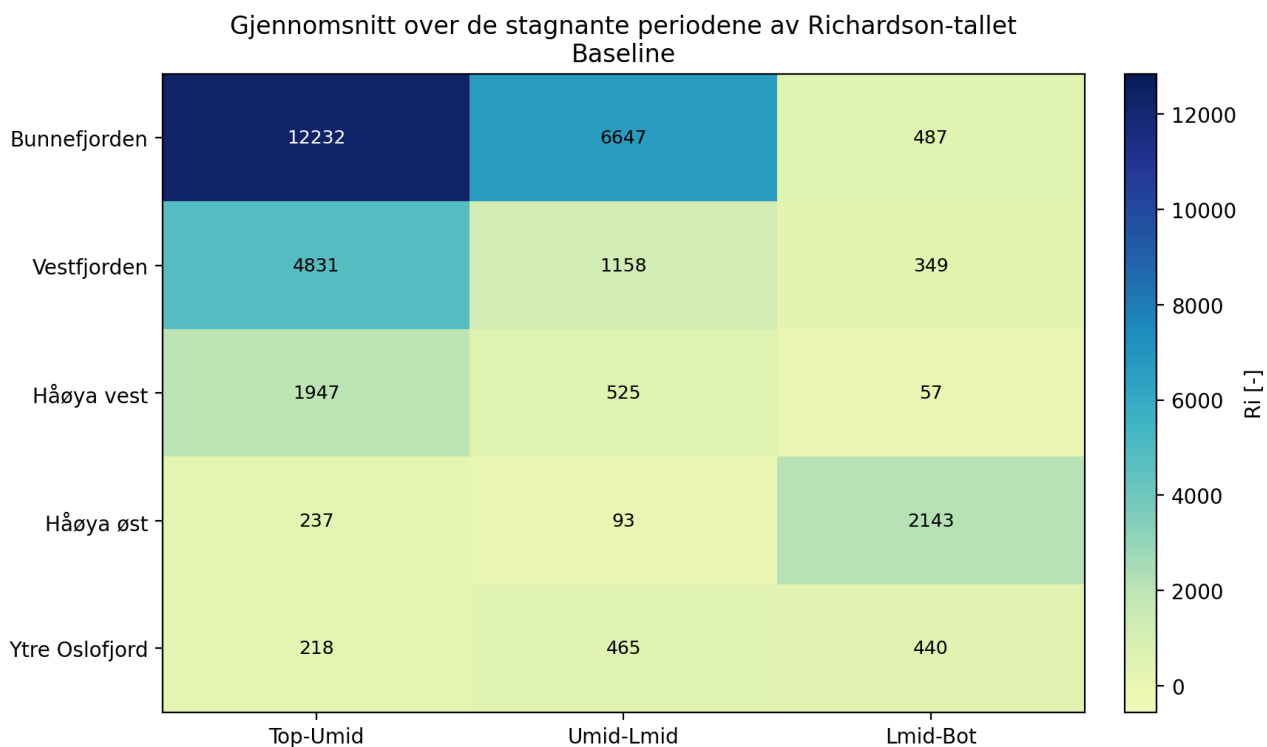
Figur 4.13 viser at scenarioendringene i Bunnefjorden og Vestfjorden er små sammenlignet med endringene rundt Håøya. I Bunnefjorden reduseres Ri i Scenario 1 med om lag 7 %, 7 % og 5 % for henholdsvis Top–Umid, Umid–Lmid og Lmid–Bot. I Scenario 2 øker Ri svakt over Top–Umid, rundt 2 %, mens Umid–Lmid og Lmid–Bot reduseres med om lag 7 % og 8 %. I Vestfjorden er endringene også små til moderate. I Scenario 1 ligger de mellom omtrent 5 % og 11 % reduksjon, og i Scenario 2 mellom omtrent 3 % og 14 % reduksjon, med størst reduksjon over Lmid–Bot. Samlet viser dette at scenarioene gir små endringer i stabiliteten i de indre bassengene, og at endringene i Vestfjorden og Bunnefjorden er langt mindre enn ved Håøya.

Rundt Håøya er endringene langt større, og de går i motsatt retning på vest- og østsiden. Ved Håøya vest reduseres Ri kraftig i begge scenarioer. I Scenario 1 er reduksjonen 46 % over Top–Umid, 31 % over Umid–Lmid og 35 % over Lmid–Bot. I Scenario 2 er reduksjonen 46 % over Top–Umid, 48 % over Umid–Lmid og 27 % over Lmid–Bot. Ved Håøya øst øker Ri derimot i begge scenarioer over alle tre grenseflater. I Scenario 1 er økningen 19 % over Top–Umid, 10 % over Umid–Lmid og 14 % over Lmid–Bot. I Scenario 2 er økningen 32 %, 19 % og 4 % over de samme grenseflatene. Dette viser at tiltaket gir redusert stabilitet på vestsiden av Håøya og økt stabilitet på østsiden, som følge av at jetéåpningen omfordeler transport og strømforhold lokalt i terskelområdet.

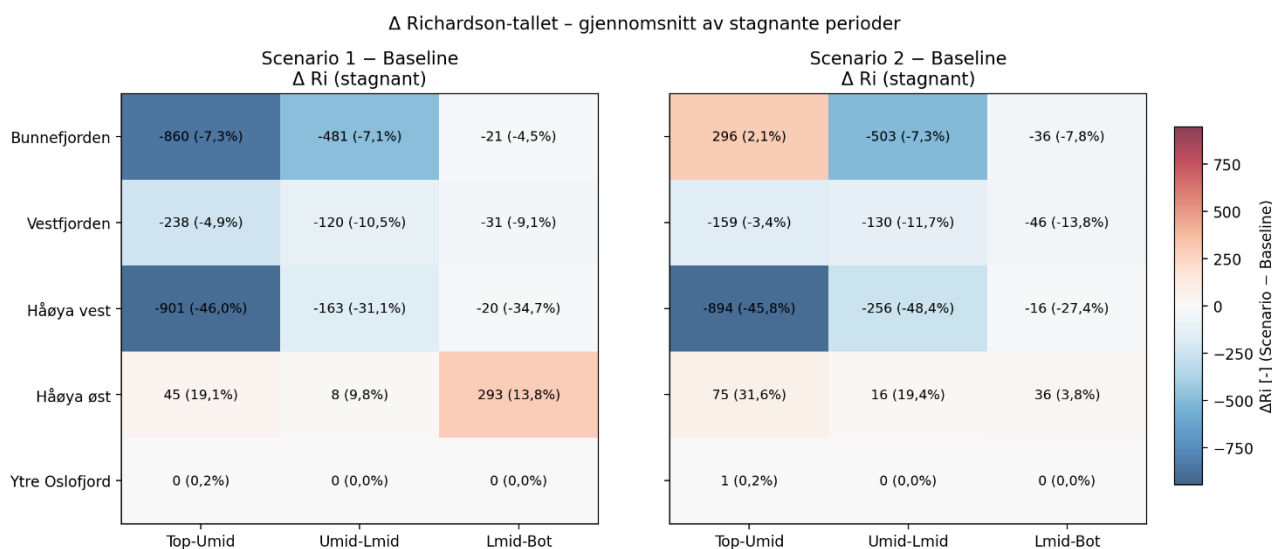
Resultatene peker mot at tiltaket først og fremst endrer stabilitet og vertikal utveksling lokalt i terskelnære områder, mens effekten i de indre bassengene er mindre. Sammenlignet med resultatene for K_z viser Ri den samme hovedstrukturen. Endringene i Bunnefjorden og Vestfjorden er små, mens endringene rundt Håøya er større og tydelig forskjellig mellom vest- og østsiden. Ved Håøya vest sammenfaller lavere Ri med tydelige endringer i K_z , mens Håøya øst viser motsatt utvikling, med høyere Ri og redusert K_z .

Resultatene for Ri kan oppsummeres slik. Her betyr lavere Ri enn i Baseline en positiv endring, fordi stabiliteten reduseres og forholdene blir mer gunstige for skjærindusert turbulens og vertikal blanding, mens høyere Ri enn i Baseline betyr en negativ endring, fordi stabiliteten øker.

- I Bunnefjorden er Ri høyest over de øvre grenseflatene og lavere over Lmid–Bot. Scenarioendringene er små, men går i hovedsak i positiv retning over de dypere grenseflatene, mens Top–Umid skiller seg ut med svak økning.
- I Vestfjorden er Ri også høyest over de øvre grenseflatene og lavere over Lmid–Bot. Scenarioendringene går gjennomgående i positiv retning, men er små sammenlignet med endringene rundt Håøya.
- Rundt Håøya er endringene langt større og går i motsatt retning på vest- og østsiden. Ved Håøya vest reduseres Ri markant, noe som betyr lavere stabilitet og mer gunstige forhold for vertikal blanding, mens Håøya øst viser motsatt respons med økt stabilitet og mindre gunstige forhold for blanding. Scenario 2 gir gjennomgående størst utslag.



Figur 4.12 Gjennomsnittlig Richardson-tall, Ri , i Baseline, beregnet over de tre stagnasjonsperiodene. Verdiene er vist for grenseflatene Top–Umid, Umid–Lmid og Lmid–Bot.

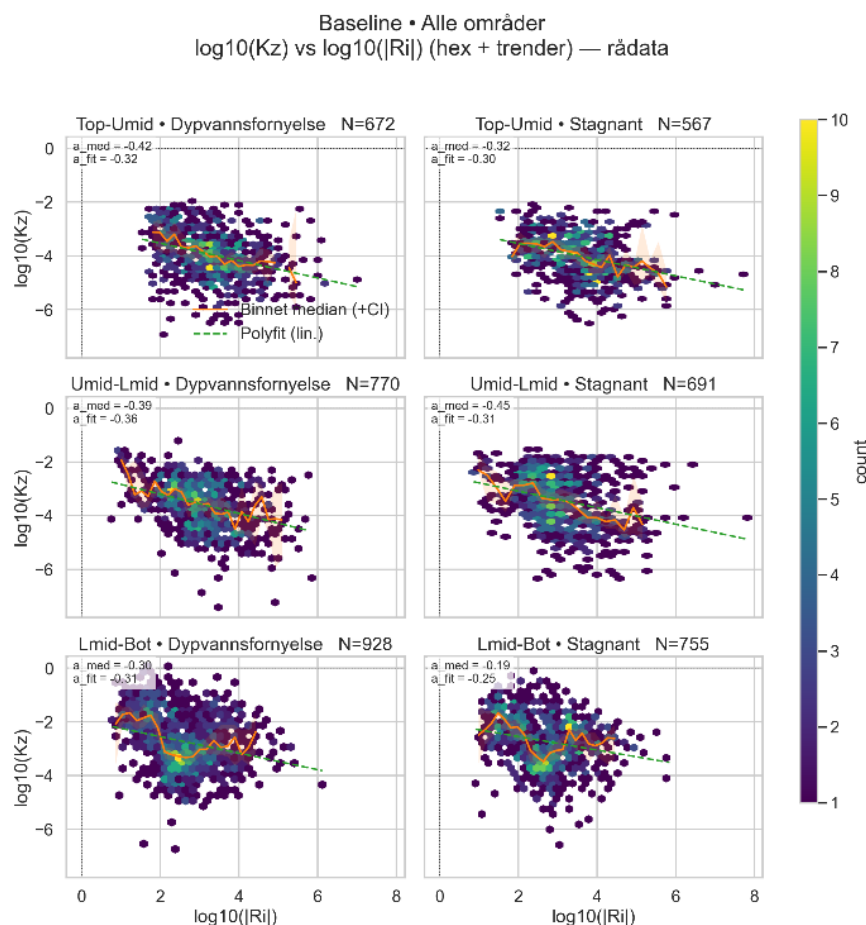


Figur 4.13 Endring i gjennomsnittlig Richardson-tall, Ri , i scenarioene relativt til Baseline, beregnet over de tre stagnasjonsperiodene. Positive verdier viser høyere Ri i scenarioet, mens negative verdier viser lavere Ri .

5 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene i sammenheng, og hvordan funnene fra sporstoffanalysen bygger videre på den hydrodynamiske delen av arbeidet. Resultatene omfatter dypvannsinnsbrudd, boksviss utskiftningstid og indikatorer for vertikal blanding og stabilitet, og gir dermed grunnlag for å vurdere både hvordan vannmassene transporteres inn i fjorden, hvordan de fordeles mellom lagene, og hvor raskt vannet i de definerte boksene erstattes. Et sentralt spørsmål er om endringene i transportveier ved terskelen også gir målbare endringer i sammensetning, utskifting og lagdeling i de indre bassengene.

Figur 5.1 viser et samlet bilde av sammenhengen mellom $\log_{10}(K_z)$ og $\log_{10}(|Ri|)$ på tvers av områder, grenseflater og periodetyper. Figuren viser en gjennomgående negativ sammenheng, der høyere $|Ri|$ i hovedsak er forbundet med lavere K_z . Den observerte sammenhengen mellom K_z og $|Ri|$ er preget av betydelig spredning, noe som reflekterer at vertikal blanding påvirkes av flere samtidige prosesser enn lokal stabilitet alene, som lokale variasjoner i strømfelt, topografi og energiomsetning. Likevel følger medianverdiene en systematisk avtagende trend med økende $|Ri|$, med en effektiv helning på rundt $-0,3$ i log-log-skala. Denne skaleringsadferden er konsistent med (Munk og Anderson 1948) stabilitetsdempning i kap. 3.5.2, der effekten av stratifikasjon uttrykkes som en gradvis reduksjon i turbulent blanding.



Figur 5.1 Sammenheng mellom $\log_{10}(K_z)$ og $\log_{10}(|Ri|)$ for alle områder og grenseflater, vist separat for perioder med dypvannsfornyelse og stagnasjon. Trendlinjene viser at høyere $|Ri|$ gjennomgående er forbundet med lavere K_z .

Resultatene i denne rapporten kan leses som et samspill mellom tre hovedelementer:

dypvannsinnsbrudd, som tilfører nytt vann til dypere lag, boksvis utskiftingstid, som beskriver hvor raskt innholdet i de definerte boksene fortynnes og erstattes, og indikatorene for vertikal blanding og stabilitet, K_z og R_i , som beskriver hvor lett egenskaper kan utveksles mellom lag. Sporstoffanalysen gjør det dermed mulig å knytte endringer i transport- og inntrengningsmønster til målbare endringer i sammensetning og utskifting av vannet i de definerte boksene.

Tidligere litteratur om Oslofjorden peker gjennomgående på at dypvannsfornyelse i de indre bassengene henger sammen med tidevannsstrøm over Drøbakerskelen, generering av indre bølger og den vertikale blandingen som følger av disse prosessene. Energien er størst nær terskelområdet og avtar innover i fjorden, noe som gir sterkere vertikal blanding nær terskelen enn i bassenger lenger inne. Dette er også brukt som forklaring på hvorfor Vestfjorden typisk har høyere blandingsnivå enn Bunnefjorden, og hvorfor Bunnefjorden kan få lange stagnasjonsperioder i dypet (Staalstrøm, et al. 2015) (A. Staalstrøm 2015) (Staalstrøm og Røed 2016). Denne prosessforståelsen gir et viktig grunnlag for å vurdere om endringer i terskelområdet også gir målbare endringer i vannmassesammensetning, utskifting og vertikal utveksling lenger inne i fjorden.

Som for alle modellbaserte studier er det knyttet usikkerhet til analysene og de tilhørende konklusjonene. Disse er generelt knyttet til modellrepresentasjonen av de relevante fysiske prosessene i Oslofjorden, til datagrunnlaget som brukes for kalibrering, og til de numeriske beregningene.

Den hydrodynamiske modellen inkluderer de sentrale prosessene som styrer vannutskiftningen i en terskelfjord. Modellen er kalibrert mot et omfattende datasett som omfatter vannstand, samt salinitets- og temperaturmålinger i profiler og tidsserier. Som vist i den hydrodynamiske rapporten gir modellen en god gjengivelse av de observerte forholdene. Én prosess som ikke er representert er saltfrigivelse ved isdannelse, som teoretisk kan bidra til økt konvektiv turbulens i perioder med isdekke. Dette vurderes imidlertid som et begrenset bidrag i de periodene der det forekommer.

En viktig del av analysene er beregning av vanntransport og salttransport. Vanntransport i et relativt lukket system som Oslofjorden er generelt godt bestemt når modellen er godt kalibrert. Det er imidlertid en viss usikkerhet knyttet til beregning av salttransport i en lagdelt fjord, fordi numeriske modeller kan overvurdere vertikal blanding som følge av numerisk diffusjon. MIKE 3-modellen benytter et vertikalt rutenett som er optimalisert for å redusere denne effekten i komplekse topografiske forhold. Samtidig er den vertikale strukturen i Oslofjorden i stor grad styrt av ferskvannstilførsel, varmeutveksling ved overflaten og innstrømning av saltere vann. At modellen klarer å gjengi utviklingen over flere år, indikerer at effekten av numerisk diffusjon er begrenset.

Sporstoffberegningene er basert direkte på de beregnede hydrodynamiske feltene og vil dermed være påvirket av de samme numeriske usikkerhetene. I analysene av vannutskifting og blanding er resultatene aggregert til større geografiske og vertikale enheter («bokser») som tilnærmet representerer homogene vannmasser, for eksempel bunnlaget i Bunnefjorden. Denne boksinndelingen er i tråd med tradisjonelle analyser av Oslofjorden i tidligere studier, men innebærer en forenkling av et kontinuerlig tredimensjonalt system. De boksvise resultatene bør derfor tolkes som integrerte mål for de definerte områdene og lagene, og ikke som en fullstendig beskrivelse av den interne variasjonen innenfor hver boks. Valg av boksinndeling og midlingsperioder kan dermed påvirke de eksakte tallverdiene, men gir samtidig et konsistent grunnlag for sammenligning og for å identifisere systematiske forskjeller mellom resultater.

Det er også viktig å merke seg at analysen er rettet mot å sammenligne scenarier som er svært like, bortsett fra den aktuelle endringen i jetéen. Selv om det er usikkerhet knyttet til de absolutte verdiene, vurderes forskjellene mellom Baseline og scenarioene som mer robuste, siden modelloppsett, boksinndeling og analysemetodikk er identiske i alle tilfeller.

Tidligere utført modellering bygger på generelle forutsetninger og gir en idealisert, stasjonær beskrivelse av gjennomsnittsforskningene i Oslofjorden (Stigebrandt og Magnusson 2002). I disse modellene representeres fjorden ved én samlet hypsografi per basseng, der den faktiske romlige variasjonen forenkles til en gjennomsnittlig dybdefordeling, og sammenhengen mellom intern

bølgeenergi og vertikal blanding er basert på relasjoner etablert for Romsdalsfjorden. Samtidig er Oslofjorden et komplekst og romlig variert system, som utvikler seg dynamisk gjennom året med betydelige variasjoner i lagdeling, innstrømning og dypvannsfornyelse. Dette gjør det krevende å sammenligne slike idealiserte og stasjonære modeller direkte og kvantitativt med mer detaljerte, tidsvarierende analyser, særlig når det gjelder relativt små påvirkninger som endringer i jetéens utforming. Hypotesen om at en åpning i jetéen kan føre til redusert vertikal blanding i de indre bassengene har i stor grad blitt videreført i senere vurderinger, men det foreligger i begrenset grad kvantitative analyser som eksplisitt dokumenterer denne sammenhengen for Oslofjorden. Modellen som er benyttet i denne rapporten er mer detaljert og ikke-stasjonær, og beskriver den romlige og tidsmessige variasjonen i fjordsystemet mer direkte. Dette kan bidra til å forklare hvorfor resultatene i denne rapporten avviker noe fra tidligere, mer idealiserte vurderinger.

5.1 Transportveier

I den hydrodynamiske analysen (DHI 2025) ble det vist at netto akkumulert volumtransport gjennom Drøbaksundet er tilnærmet lik i Baseline, Scenario 1 og Scenario 2, slik en også ville forvente for et snitt som dekker hele sundet, se kap. 4.2.2 og Tabell B.1. Snittet gjennom Drøbaksundet er vist i Figur 3.6 i DHI (2025).

Samtidig ble det i den hydrodynamiske rapporten i hovedsak lagt vekt på netto vanntransport og salttransport, mens inn- og utstrømning hver for seg ikke ble analysert for volumtransporten. I Tabell 5.1 og Tabell 5.2 i denne rapporten vises at både positiv og negativ akkumulert volumtransport i Drøbaksundet øker i scenarioene, og at økningen er størst i Scenario 2. Dette betyr at vannbalansen over snittet som helhet fortsatt er tilnærmet uendret, men at mer vann passerer gjennom sundet i begge retninger. Tidsserier for differansene, både som akkumulert volumtransport og som volumtransport per tidssteg, er vist i Vedlegg A.3.

Denne forskjellen er viktig for tolkningen av vannutskiftning. Uendret netto volumtransport betyr at netto vanntransport inn i Indre Oslofjord i liten grad endres, mens økt positiv og negativ akkumulert volumtransport betyr at vannutvekslingen gjennom Drøbaksundet blir noe større. Dette peker mot økt gjennomstrømning og mer aktiv utveksling ved terskelen. En slik tolkning er også konsistent med sporstoffresultatene, som viser små, men gjennomgående kortere boksvis utskiftningstid i Bunnefjorden og Vestfjorden, og dermed noe raskere fortynning og utskifting av vannet i de definerte boksene, se kap. 4.2. Resultatene fra Håøya øst og vest brukes her først og fremst til å beskrive den lokale responsen i terskelområdet, mens Vestfjorden og Bunnefjorden er de sentrale områdene for vurdering av hvordan endringene forplanter seg inn i de indre bassengene.

Transportanalysene bidrar også til å forklare forskjellen mellom Vestfjorden og Bunnefjorden i sporstoffresultatene. Selv om toppnivået av ytre vannmasser i Vestfjorden Bot endres lite i scenarioene, betyr ikke dette nødvendigvis at transporten av ytre vannmasser gjennom Vestfjorden er uendret. Vestfjorden har allerede høy andel ytre vannmasser i Baseline under dypvannsinbrudd, og økt gjennomstrømning kan derfor i større grad komme til uttrykk som videre transport inn mot Bunnefjorden enn som et høyere toppnivå i Vestfjorden. Dette er konsistent med at scenarioeffekten i sporstoffanalysen er tydeligere i Bunnefjorden, særlig i Scenario 2.

Samtidig må dette tolkes nøkternt. I den hydrodynamiske analysen ble det presisert at positiv akkumulert transport ikke nødvendigvis er det samme som effektiv fornyelse av vannmasser, fordi samme vannmasse kan registreres flere ganger dersom den beveger seg fram og tilbake over et snitt. Økt inn- og utstrømning i Drøbaksundet kan derfor ikke alene tas som bevis for bedre dypvannsfornyelse i de indre bassengene. Først når dette ses sammen med akkumulert salttransport, sporstoffsammensetningen, boksvis utskiftningstid og indikatorene for vertikal blanding og stabilitet, blir bildet tydeligere. Samlet peker resultatene da mot at scenarioene, særlig Scenario 2, ikke bare endrer transportveiene i terskelområdet, men også gir en liten økning i den funksjonelle vannutskiftningen lenger inne i systemet.

Tabell 5.1 Positiv akkumulert volumtransport Drøbaksundet (det som går inn gjennom Drøbaksundet).

	Positiv akkumulert volumtransport (m ³ /s)			Positiv akkumulert volumtransport differanse (%)	
	Baseline	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 1	Scenario 2
2022	2607	2638	2661	1.2	2.1
2023	2578	2607	2624	1.1	1.8
Gjennomsnitt	2592	2623	2643	1.2	1.9

Tabell 5.2 Negativ akkumulert volumtransport Drøbaksundet (det som går ut av Drøbaksundet).

	Negativ akkumulert volumtransport (m ³ /s)			Negativ akkumulert volumtransport differanse (%)	
	Baseline	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 1	Scenario 2
2022	-2620	-2651	-2674	1.2	2.0
2023	-2616	-2646	-2663	1.1	1.8
Gjennomsnitt	-2618	-2648	-2668	1.2	1.9

Tidligere vurderinger av inngrep ved Drøbaksundet og Drøbaktterskelen har i stor grad vært knyttet til hvordan terskelgeometrien påvirker strømfordeling, tidevannshastighet og energitap i terskelområdet. En CFD-beregning utført for Kystverket viser at tiltaket kan øke volumtransporten vest av Håøya og over jetéåpningen, samtidig som transporten over Drøbakgrunnen reduseres, og at omrøringsnivået bak åpningen øker mens omrøringen bak Drøbakgrunnen reduseres (Helgedagsrud 2022). Dette samsvarer godt med resultatene i denne rapporten. Den hydrodynamiske analysen viser at tiltaket først og fremst endrer hvordan vann og salt fordeles mellom løpene i terskelområdet, ved at positiv salttransport øker gjennom jetéåpningen, særlig i Scenario 2, samtidig som positiv salttransport over Småskjær–Drøbak og Håøya–Drøbak reduseres. Sporstoffresultatene passer godt inn i dette bildet ved at endringene rundt Håøya beskriver den lokale responsen nær jetéåpningen, mens endringene i Vestfjorden og Bunnefjorden viser hvordan denne omfordelingen kommer til uttrykk lenger inne i fjordsystemet.

5.2 Dypvannsinnebrudd

Oslofjordens vannutskiftning har vært gjenstand for en rekke undersøkelser og observasjoner. (Johannesen 1963) studerte strømfordelingene over Drøbaktterskelen og analyserte fjordens sirkulasjon, mens (Gade 1970) gjennomførte tilsvarende analyser av sirkulasjonsmønstrene. Stigebrandt utviklet senere hypoteser og modeller der turbulens generert av indre bølger fremheves som en sentral drivmekanisme (Stigebrandt 1979). (A. Staalstrøm 2005), (A. Staalstrøm 2015) og (Staalstrøm og Røed 2016) har gjennomført både modellstudier og observasjonsbaserte analyser av blanding og vannutskiftning i Oslofjorden.

Samlet peker denne litteraturen mot at fjordens vannutskiftning, og særlig fornyelsen av bunnvannet, i stor grad er dominert av episodiske dypvannsinnebrudd av saltere vann, avløst av roligere perioder der vertikal blanding og tidevannsforhold spiller en viktig rolle. (Saesin 2021) presenterer blant annet en 40-årig tidsserie av bunnvannssalinitet i Vestfjorden og Bunnefjorden, som tydelig illustrerer dette vekselvise mønsteret mellom innstrømningsperioder og stagnasjon.

(Gade 1970) foreslo at dypvannsfornyelsen blant annet kan være påvirket av nordlige vindforhold, der vindstuvning kan bidra til å presse dypere vannmasser inn i Bunnefjorden. (Saesin 2021) har undersøkt vannutskiftningen spesifikt for Bunnefjorden og finner at nordlige vinder ser ut til å ha en effekt, men at også vindstuvning i Skagerrak og i den sørlige delen av fjorden kan påvirke dypvannsinnebruddene.

Tidligere litteratur peker ikke på at en åpning i jetéen nødvendigvis vil hindre dypvannsinnebrudd som prosess. Det som tidligere er fremhevet, er heller at endret terskelgeometri kan påvirke de prosessene som legger til rette for dypvannsfornyelse over tid, særlig gjennom endringer i tidevannshastighet,

indrebølgegenerering og vertikal blanding (Stigebrandt og Magnusson 2002) (A. Staalstrøm 2015) (Staalstrøm og Røed 2016). Dette er en viktig nyanse i sammenligningen med resultatene i denne rapporten. Her viser den hydrodynamiske modellen at alle dypvannsinnebrudd som identifiseres i Baseline også forekommer i Scenario 1 og Scenario 2. Tiltaket ser dermed ikke ut til å hindre dypvannsinnebrudd som hendelse, men heller å endre hvilken vei vannmassene tar inn i fjorden og hvordan dette slår ut i sammensetningen av vannmassene lenger inne i systemet. Scenario 2 er i denne sammenheng det scenariet som tydeligst gir dypere vann en alternativ innstrømningsvei gjennom jetéåpningen.

Sporstoffanalysen viser hvordan denne omfordelingen slår ut i de definerte boksene. I Vestfjorden er andelen ytre komponenter allerede høy i Baseline, og scenarioene gir derfor hovedsakelig endringer på noen få prosentpoeng, heller enn et tydelig og vedvarende skifte i sammensetningen av bunnvannet. I Bunnefjorden er responsen tydeligere, særlig i Scenario 2, der andelen ytre vannmasser i bunnlaget øker mer og vedvarer gjennom større deler av periodene etter innebrudd. Dette taler for at Scenario 2 i større grad enn Scenario 1 endrer hvor mye av det ytre vannet som faktisk preger de indre bassengene over tid.

5.3 Boksvis utskiftningstid

Et sentralt spørsmål i både tidligere litteratur og i denne rapporten er om økt tilførsel av saltvann også innebærer mer effektiv fornyelse av bunnvannet. Tidligere studier av Oslofjorden har i hovedsak diskutert dette gjennom blandingsnivå, stagnasjonsperioder og tetthetsutvikling, heller enn gjennom et direkte sporstoffbasert mål på utskiftning. Observasjoner og modellstudier viser at Bunnefjorden har svakere vertikal blanding og lengre stagnasjonsperioder enn Vestfjorden (A. Staalstrøm 2015) (Staalstrøm og Røed 2016). Dette er i tråd med at sporstoffanalysen i denne rapporten viser lengre boksvis utskiftningstid i Bunnefjorden enn i Vestfjorden i Baseline.

Samtidig viser scenarioene at boksvis utskiftningstid reduseres i både Bunnefjorden og Vestfjorden. Dette peker mot at vannet i de definerte boksene fortynnes og erstattes noe raskere enn i Baseline, men endringene i de indre bassengene er små. Resultatene bør derfor tolkes som en svak, men gjennomgående positiv respons, og ikke som en stor endring i bassengskala vannutskiftning.

Ved Håøya er responsen tydeligere og mer lokalt styrt. Vestsiden og østsiden responderer i motsatt retning, noe som viser at tiltaket først og fremst omfordeler transport og utskiftning i terskelområdet. Dette er konsistent med den hydrodynamiske analysen, der Scenario 2 i størst grad endrer transportveiene gjennom den nye åpningen. Sporstoffanalysen viser at denne lokale omfordelingen også kan spores som målbare, men moderate, endringer i Bunnefjorden og Vestfjorden.

Dette gir en viktig nyanse i sammenligningen med den hydrodynamiske rapporten. Transportanalysene der viser at Scenario 2 i størst grad omdirigerer transporten gjennom den nye åpningen, mens sporstoffanalysen viser at denne omfordelingen også gir målbare endringer i boksvis utskiftningstid i Bunnefjorden og Vestfjorden.

5.4 Vertikal blanding

Tidligere litteratur har i stor grad knyttet mulig effekt av inngrep ved terskelen til redusert tidevannshastighet, mindre energi til indre bølger og dermed svakere vertikal blanding. Den klassiske tiltaksutredningen fra NIVA vurderte at økt tverrsnittsareal over Drøbaktterskelen kunne redusere tidevannsrelatert omrøring i Vestfjorden med om lag 2 % (Stigebrandt og Magnusson 2002). Denne vurderingen er viktig som referanse, fordi den peker på en mulig negativ effekt av tiltaket på blandingsforholdene i de indre bassengene.

I tidligere studier av (Staalstrøm og Røed 2016) er det estimert vertikale blandingskoeffisienter basert på målinger og idealiserte modellsimuleringer over korte tidsperioder. Studien viser at den vertikale blandingen i stor grad er knyttet til forplantning av energi fra indre bølger i fjorden. Disse bølgene

dannes ved Drøbakerskelen og avtar relativt raskt innover i fjorden. Samtidig påpekes det i studien at det er betydelig usikkerhet knyttet til en direkte kvantitativ sammenheng mellom intern bølgeenergi og diffusivitet.

For Oslofjorden anslås vertikal blandingskoeffisient, K_z , til om lag $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ i Vestfjorden og $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ i Bunnefjorden (Staalstrøm og Røed 2016). (Saesin 2021) har gjort en tilsvarende sammenstilling for stagnasjonsperioder i perioden 1975–2018 og finner verdier på om lag $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ i Vestfjorden og $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ i Bunnefjorden, med en standardavvik på om lag $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Disse nivåene er i samme størrelsesorden som de beregningene som er gjort i denne rapporten.

(Staalstrøm og Røed 2016) undersøkte også sammenhenger for blandingseffektivitet tilsvarende det som er vist i Figur 5.1, men konkluderte med at datagrunnlaget var for usikkert til å etablere en entydig relasjon. Dette ble blant annet knyttet til den korte beregningsperioden. (Saesin 2021) har foreslått en lignende tilnærming, men uten å etablere en spesifikk sammenheng tilpasset Oslofjorden.

I den hydrodynamiske rapporten beskrives Scenario 2 som et scenario med sterkere lagdelingstendens og større variasjon i stabilitet enn Scenario 1, men analysene av potensiell energianomali, PEA, viser også at forskjellene mellom scenarioene er små sammenlignet med den naturlige sesongvariasjonen. Dette peker mot at tiltaket i større grad endrer variasjonsmønsteret i vannsøylen enn det endrer et gjennomsnittlig stabilitetsnivå på en enkel måte. Den hydrodynamiske delen av arbeidet pekte derfor ikke entydig mot en klar forbedring eller forverring i de indre bassengene, men mot et system der Scenario 2 gir større svingninger og mer markerte avvik enn Scenario 1.

Resultatene i denne rapporten viser ikke en tydelig negativ respons i Bunnefjorden og Vestfjorden. Tvert imot går endringene i K_z i hovedsak i positiv retning i de indre bassengene, det vil si mot større beregnet vertikal utveksling. I Bunnefjorden øker K_z over alle tre grenseflater i begge scenarioer, og økningen er tydeligst i Scenario 2. I Vestfjorden er bildet mer variabelt, men også her er endringene i hovedsak svakt positive over de dypere grenseflatene, mens overflatevann (Top–Umid) er tilnærmet uendret i Scenario 1 og svakt negativ i Scenario 2. Samlet betyr dette at scenarioene ikke peker mot redusert vertikal utveksling i de indre bassengene, men heller mot små og i hovedsak positive endringer, særlig i Bunnefjorden.

Richardson-tallet peker i samme retning. I denne rapporten betyr lavere Ri enn i Baseline en positiv endring, fordi stabiliteten reduseres og forholdene blir mer gunstige for skjærindusert turbulens og vertikal blanding, mens høyere Ri betyr en negativ endring. I Bunnefjorden reduseres Ri over de dypere grenseflatene i begge scenarioer, mens Top–Umid viser liten endring og en svak økning i Scenario 2. I Vestfjorden går endringene gjennomgående i positiv retning over alle tre grenseflater, men utslagene er små. Samlet viser K_z og Ri derfor et konsistent bilde i de indre bassengene: endringene er små, men de går i hovedsak i retning av noe mindre stabilitet og noe større vertikal utveksling, ikke mot svakere blanding.

Dette er et viktig resultat i sammenligningen med både tidligere litteratur og den hydrodynamiske rapporten. Der tidligere vurderinger pekte mot at økt tverrsnitt kunne gi noe svakere blanding i Vestfjorden, og der den hydrodynamiske rapporten beskrev Scenario 2 som et scenario med større stabilitetssvingninger og tendens til tregere blanding, viser scenarioene i denne rapporten i stedet små, men i hovedsak positive endringer i de indre bassengene. Det betyr ikke at tiltaket gir en stor forbedring i blandingsforholdene, men at resultatene heller ikke støtter en tydelig negativ effekt på vertikal blanding i Bunnefjorden og Vestfjorden.

Ved Håøya viser resultatene en tydelig lokal respons på vest- og østsiden av terskelområdet. Ved Håøya vest reduseres Ri markant, samtidig som K_z endres kraftig, noe som peker mot mindre stabilitet og mer gunstige forhold for vertikal blanding. Ved Håøya øst er responsen motsatt, med høyere Ri og redusert K_z , altså større stabilitet og mindre gunstige forhold for blanding. Tiltaket ser dermed først og fremst ut til å endre den lokale fordelingen av vertikal utveksling og stabilitet i terskelnære områder.

En viktig nyanse er at utviklingen i bunnsalinitet ikke kan tolkes som et rent mål på vertikal blanding. Saliniteten i bunnvannet påvirkes samtidig av vertikal utveksling, horisontal tilførsel og retur, samt endringer i bakgrunnssaliniteten i vannmassene som omgir bunnlaget. Når scenarioene endrer

transportveier og øker tilførselen av saltvann gjennom jetéåpningen, kan en langsommere reduksjon i bunnsalinitet derfor skyldes endret tilførsel og omfordeling av saltvann, ikke nødvendigvis svakere turbulent blanding alene. Dette er konsistent med at sporstoffresultatene viser økte andeler ytre komponenter i bunnboksene, samtidig som K_z og Ri i Bunnefjorden og Vestfjorden endres relativt lite på boks nivå.

5.5 Boksinnndeling og lagdeling

Tidligere observasjoner fra indre Oslofjord viser at dypvannsinnebrudd hovedsakelig påvirker de dypere delene av vannsøylen, og at stagnasjonsperioder i Bunnefjorden er knyttet til svak vertikal blanding og sjeldnere dypvannsfornyelse enn i Vestfjorden (A. Staalstrøm 2015) (Staalstrøm og Røed 2016). I den sammenhengen fungerer boksene Umid, Lmid og Bot som en forenklet, men fysisk forankret representasjon av den lagdelte strukturen i fjorden. Dette er særlig relevant i Bunnefjorden, der de ytre komponentene ofte setter et tydeligere signal i Lmid og Bot tidlig i periodene, mens Umid i større grad reflekterer den videre utviklingen gjennom perioden.

Mot slutten av periodene kan Umid bli lik eller høyere enn Lmid og Bot for de sammenslåtte ytre komponentene. Dette kan tolkes som at de første og sterkeste innebruddene setter sitt tydeligste spor i de dypere lagene, mens Umid i større grad reflekterer den videre utviklingen gjennom perioden. En mulig forklaring er at senere og svakere tilførsler av ytre vannmasser i større grad påvirker Umid enn de dypeste lagene. Denne tolkningen er også forenlig med lagdelingen slik den fremstår i den hydrodynamiske rapporten. Når inntrengningene av saltere vann i stor grad følger de dypere delene av vannsøylen, er det rimelig at Lmid og Bot reagerer tydeligst først. Når forskjellen mellom lagene senere avtar, kan dette forstås som at vannmassesignaturen gradvis forskyves oppover i overgangslaget, heller enn at den forblir sterkest i det dypeste laget gjennom hele perioden.

Samtidig innebærer boksinnndelingen en forenkling av et kontinuerlig og tredimensjonalt modellfelt. Hver boks består av mange modellceller, og konsentrasjon, strøm og blanding kan variere innenfor boksen. De boksvise verdiene bør derfor tolkes som representative integrerte mål for et definert område og dybdelag, ikke som et uttrykk for at vannmassene i boksen er fullstendig homogene.

Et viktig poeng i sammenligningen med tidligere litteratur er samtidig forskjellen mellom lokal naturtypeeffekt og regional bassengrespons. Tidligere rapporter legger stor vekt på lokale strømforhold over og nær jetéen som forutsetning for naturtypen og det lokale biologiske mangfoldet, og peker på at endringer i strømhastighet kan gi betydelig lokal endring i habitatforhold (Walday 2002) (Lundsør, Breyholtz og Liane 2022). Dette er et annet vurderingsnivå enn boks- og bassengskala dypvannsfornyelse, og det kan derfor være forenlig med at bassengskala indikatorer endres lite, samtidig som lokale habitatforhold kan endres mer. Resultatene i denne rapporten peker nettopp i en slik retning. De største endringene i transport, boksvis utskiftningstid, K_z og Ri er lokalisert rundt Håøya og terskelområdet, samtidig som endringene i Bunnefjorden og Vestfjorden må tolkes på bassengskala.

Resultatene for stagnasjonsperiodene må tolkes i lys av at periodene ikke er fullstendig stagnante. De er valgt fordi stagnasjon er den dominerende tilstanden, men det forekommer enkelte mindre innslag av saltere vann i løpet av periodene, og dette varierer mellom år, lag og bassenger. Slike hendelser kan påvirke både sporstoffsammensetning, boksvis utskiftningstid og indikatorene for vertikal blanding og stabilitet.

Boksvis utskiftningstid er også avhengig av valgt sluttidspunkt, fordi verdien beregnes som et integral over analyseperioden. Dersom den gjenværende sporstoffandelen ikke har gått mot null, vil en lengre eller kortere analyseperiode kunne gi andre absolutte verdier. Tallene bør derfor tolkes som periodeavhengige mål på fortynning og utveksling. Samtidig viser resultatene at hovedbildet er konsistent på tvers av de tre analyserte stagnasjonsperiodene, ved at boksvis utskiftningstid i hovedsak reduseres i scenarioene sammenlignet med Baseline. Siden samme periodeavgrensning brukes for Baseline og scenarioene, vurderes derfor den relative forskjellen mellom scenarioene som mer robust enn de absolutte tallverdiene alene.

Samlet viser sammenligningen med litteraturen at vurderingene i stor grad bygget på en mekanisme der redusert tidevannshastighet kunne gi mindre energi til indre bølger og dermed svakere vertikal blanding i terskelnære bassenger. (Stigebrandt og Magnusson 2002) pekte mot redusert vertikalturbulens og lengre tidsskala for utskifting i Vestfjorden for det tiltaket som der ble analysert. Scenarioene i denne rapporten er ikke direkte sammenlignbare med tiltaket i (Stigebrandt og Magnusson 2002), men resultatene viser ikke en tilsvarende negativ respons i Bunnefjorden og Vestfjorden. I stedet viser scenarioene her en svak tendens til mindre stabilitet og noe større vertikal utveksling, samt kortere boksvis utskiftningsid i begge bassenger.

6 Konklusjon

Resultatene viser at scenarioene først og fremst endrer transportveier og lokal dynamikk i terskelområdet og rundt Håøya. I dypvannsinnbruddsperiodene gir scenarioene økt innslag av ytre vannmasser, særlig i Bunnefjorden og særlig i Scenario 2. I stagnasjonsperiodene viser Bunnefjorden og Vestfjorden små, men i hovedsak positive endringer sammenlignet med Baseline, ved at vannet fortynnes og erstattes noe raskere, og ved at resultatene samlet peker mot noe større vertikal utveksling og noe mindre stabilitet. Scenario 2 gir gjennomgående større utslag enn Scenario 1.

Resultatene viser at alle dypvannsinnbrudd som identifiseres i Baseline forekommer også i Scenario 1 og Scenario 2. Forskjellen ligger i større grad i hvilken vei vannmassene tar inn i fjorden, og hvordan dette slår ut i vannmassenes sammensetning lenger inne i systemet. Sporstoffanalysen viser at begge scenarioer gir økt innslag av ytre vannmasser i de analyserte lagene, men at utslaget er forskjellig i Vestfjorden og Bunnefjorden. I Vestfjorden er andelen ytre vannmasser allerede høy i Baseline, og scenarioene gir derfor hovedsakelig mindre omfordelinger rundt et allerede høyt nivå. I Bunnefjorden er andelen ytre vannmasser lavere i Baseline eller etableres senere etter innbrudd, og scenarioene gir derfor et tydeligere utslag enn i Vestfjorden, særlig i Scenario 2.

Boksvis utskiftningstid viser små positive endringer i de indre bassengene sammenlignet med Baseline. Dette innebærer at vannet i de definerte boksene fortynnes og erstattes noe raskere enn i Baseline. I Bunnefjorden blir boksvis utskiftningstid kortere i alle lag i begge scenarioer, mens endringene i Vestfjorden er mindre og mer lagavhengige. Rundt Håøya er responsen mer lokalt styrt, med kortere boksvis utskiftningstid på vestsiden og lengre boksvis utskiftningstid på østsiden. Dette henger sammen med at jetéåpningen endrer transportveiene i terskelområdet og dermed omfordeler hvor vannet strømmer og skiftes ut lokalt rundt Håøya.

Den tidligere vurderingen av endringer i jetéen hos (Stigebrandt og Magnusson 2002), pekte på at økt tverrsnittsareal over Drøbaktersekelen kunne redusere den tidevannsrelaterte vertikale omrøringen i Vestfjorden med om lag 2 %, og dermed gi mindre gunstige forhold for dypvannsfornyelse. Mot dette bakteppet er resultatene for K_z og Ri i denne rapporten en viktig nyanse. I Bunnefjorden og Vestfjorden er endringene små, men de peker ikke i retning av svakere vertikal blanding. Tvert imot viser K_z i hovedsak små positive endringer, mens Ri over flere grenseflater går i retning av noe mindre stabilitet og dermed mer gunstige forhold for vertikal blanding. Senere studier av (Staalstrøm og Røed 2016) kunne imidlertid ikke påvise en klar sammenheng mellom intern bølgeenergi og vertikal turbulent diffusivitet (K_z). Resultatene i denne rapporten støtter ikke en tilsvarende negativ respons i Bunnefjorden og Vestfjorden, men peker heller mot små og i hovedsak svakt positive endringer i vertikal utveksling og stabilitet.

Formålet med analysen har vært å undersøke om en ny åpning i jetéen ved Drøbaksundet gir målbare endringer i dypvannsinnbrudd, fortynning, utskifting og vertikal blanding i indre Oslofjord, og hvordan eventuelle endringer fordeler seg mellom terskelområdet og de indre bassengene. Resultatene viser at scenarioene gir målbare endringer, men at responsen er ulik i terskelområdet og i de indre bassengene. Analysen viser hvordan tiltaket påvirker transport, sammensetning og utskifting av vannmasser, men den kvantifiserer ikke direkte hvordan disse endringene slår ut i oksygenutvikling, biogeokjemisk omsetning eller økologisk tilstand.

Hovedkonklusjonene er som følger:

- Scenarioene endrer transportveiene i terskelområdet rundt Håøya. Dette er området der jetéåpningen virker direkte, og her omfordeles strøm, utskifting og stabilitet lokalt. Vest- og østsiden av Håøya responderer i motsatt retning, noe som viser at tiltaket ikke gir en ensartet endring i hele terskelområdet.
- Dypvannsinnbrudd forekommer fortsatt i begge scenarioene, og scenarioene gir økt innslag av ytre vannmasser sammenlignet med Baseline. Effekten er tydeligst i Bunnefjorden, særlig i Scenario 2, der andelen ytre vannmasser i bunnlaget øker i alle tre dypvannsinnbruddsperiodene. Økningen er om lag 2–3 prosentpoeng i Di1 (2021), 9–10

prosentpoeng i Di2 (2022) og 6–7 prosentpoeng i Di3 (2023). Dette viser at Scenario 2 i større grad enn Scenario 1 øker andelen ytre vannmasser som når inn til Bunnefjorden.

- Analysene av fortytning og boksviss utskiftningstid viser små, men positive endringer i Bunnefjorden og Vestfjorden. Med positive endringer menes at vannet i de definerte boksene fortyntes og erstattes noe raskere enn i Baseline. I Bunnefjorden blir boksviss utskiftningstid kortere i alle lag i begge scenarioer, mens endringene i Vestfjorden er mindre og mer lagavhengige.
- Resultatene for vertikal blanding og stabilitet viser små endringer i Bunnefjorden og Vestfjorden, men samlet peker K_z og Ri mot noe større vertikal utveksling og noe mindre stabilitet enn i Baseline. Dette innebærer mer gunstige forhold for vertikal blanding i de indre bassengene, og står i kontrast til tidligere vurderinger som har pekt på at inngrep ved terskelen kunne gi svakere vertikal blanding i Vestfjorden som følge av tidevannsrelaterte prosesser.
- Ved Håøya viser resultatene en tydelig lokal respons på endringene i jetéen. På vestsiden blir boksviss utskiftningstid kortere, den vertikale blandingen større og stabiliteten lavere. På østsiden er responsen motsatt, med lengre boksviss utskiftningstid, mindre vertikal blanding og høyere stabilitet. Dette viser at jetéåpningen først og fremst omfordeler strømforhold, utskifting og vertikal blanding lokalt i terskelområdet.
- Samlet viser rapporten at Scenario 2 gir større endringer enn Scenario 1. Endringene er tydeligst i terskelområdet, men kan også spores som små, gjennomgående positive endringer i Bunnefjorden og Vestfjorden. Rapporten viser dermed noe økt innslag av ytre vannmasser, noe raskere fortytning og utskifting, og noe mer gunstige forhold for vertikal blanding sammenlignet med dagens situasjon.

7 Referanser

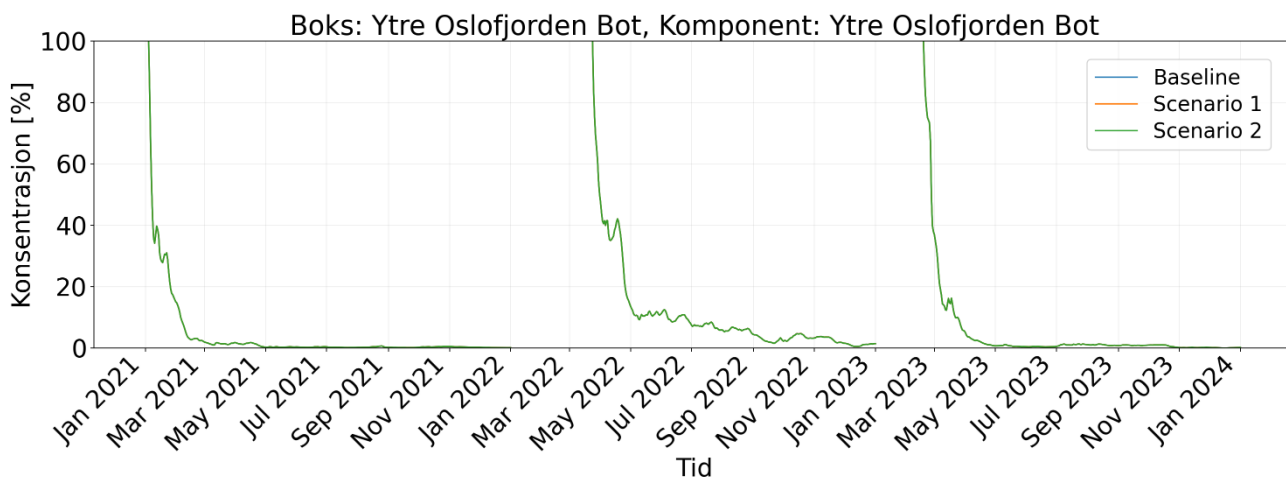
- Berntsen, Jarle. 2002. «Internal Pressure Errors in Sigma-Coordinate Ocean Models.» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19 (9): 1403–1414.
https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/19/9/1520-0426_2002_019_1403_ipeisc_2_0_co_2.xml.
- Burchard, Hans, og Richard Hofmeister. 2008. «A dynamic equation for the potential energy anomaly for analysing mixing and stratification in estuaries and coastal seas,» *Estuarine, Coastal and Shelf Science*,.
- DHI. 2023. «DHI-GHM: Real-time and forecasted hydrology for the entire planet.»
- DHI. 2018. «Hydrodynamic Model of North Sea and UK Waters (UKNS2), Setup and Validation, version 2.»
- DHI. 2025. *Hydrodynamisk Modelling Av Oslofjorden*. DHI.
- DHI. 2025. «MIKE 1D - DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling - Reference Manual.»
- . 2024. «MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Mud Transport Module Scientific Documentation.» Hørsholm: DHI.
https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2024/Coast_and_Sea/MIKE_213_MT_FM_ScientificDoc.pdf.
- DHI. 2024. «MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic and Transport Module - Scientific Documentation.»
- Gade, Herman G. 1973. «Deep water exchange in a sill fjord: a stochastic process.» *J. Physical Oceanography* 3 (2) 213-219.
- Gade, Herman G. 1970. «Hydrographic investigations in the Oslofjord, a study of Water Circulation and Exchange Processes.» Geophysical institute. Div. A. Physical Oceanography. University of Bergen.
- Helgedagsrud, Tore. 2022. «Analyserapport - CFD-simuleringer av utdypning i sjeté.»
- Johannesen, O M. 1963. *Strømundersøkelser i Drøbaksundet- Del 1. Undersøkelsen 1962-1965. DelRapport nr. 19. Oslofjordsprosjektet*. NIVA.
- Lundsør, Elisabeth, Bente Breyholtz, og Amalie Sofie Liane. 2022. «Kartlegging av marine naturverdier - Håøya vest og Drøbakssundet.»
- Munk, W.H., og E.A. Anderson. 1948. Notes on a theory of the thermocline. *J. Marine*, 3(1):276-295.
- Murray, Alexandra M., Gregers H. Jørgensen, Peter N. Godiksen, Jannik Anthonj, og Henrik Madsen. 2023. «DHI-GHM: Real-time and forecasted hydrology for the entire planet.» *Journal of Hydrology (Journal of Hydrology)*.
- NIVA. 2002. «Utredning av konsekvenser for vannutskiftningen i indre Oslofjord ved utvidelsen av skipsleden over Drøbakerskelen.»
- Petersen, Ole Svenstrup, og Hans Burchard. 1998. «Hybridization between σ - and z-co-ordinates for improving the internal pressure gradient calculation in marine models with steep bottom slopes.» *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.
[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1097-0363\(19971115\)25:9%3C1003::AID-FLD600%3E3.0.CO;2-E](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1097-0363(19971115)25:9%3C1003::AID-FLD600%3E3.0.CO;2-E).
- Saesin, Pipatthra. 2021. *A study of water exchanges between the Bunnefjord and the Vestfjord, inner Oslofjord using observational data and high-resolution model simulations*. University of Oslo.

- Solbrekke, Ida Marie , Asgeir Sorteberg, og Hilde Haakenstad. 2021. «The 3 km Norwegian reanalysis (NORA3) – a validation of offshore wind resources in the North Sea and the Norwegian Sea.»
- Stigebrandt, Anders. 1979. «Observational Evidence for Vertical Diffusion Driven by Internal Waves of Tidal Origin in the Oslofjord.» *Journal of Physical Oceanography*.
- Stigebrandt, Anders. 1976. «Vertical Diffusion Driven by Internal Waves in a Sill Fjord.» *Journal of Physical Oceanography*.
- Stigebrandt, Anders, og Jan Magnusson. 2002. Utredning av konsekvenser for vannutskiftningen i indre Oslofjord ved utvidelsen av skipsleden over Drøbakerskelen. NIVA.
- Staalstrøm, Andre, Bengt Liljebladh, og E. Aas. 2012. «Propagation and dissipation of internal tides in the Oslofjord.» *Ocean Science*.
- Staalstrøm, André. 2015. «Betydningen av indre bølger i Oslofjorden.» *Vann* 259-266.
- Staalstrøm, André. 2005. Volumtransport i Drøbaksundet og vannstandsendringer i indre Oslofjord. Universitet i Oslo.
- Staalstrøm, Andre, Lars Arneborg, Bengt Liljebladh, og Göran Broström. 2015. «Observations of Turbulence Caused by a Combination of Tides and Mean Baroclinic Flow over a Fjord Sill.» *Journal of Physical Oceanography* 355-368.
- Staalstrøm, André, og Lars Petter Røed. 2016. «Vertical mixing and internal wave energy fluxes in a sill fjord.» *Journal of Marine Systems*.
- Walday, Mats. 2002. «Biologiske registreringer på Drøbakgrunnen og jeteen ved hjelp av ROV i forbindelse med en utvidelse av skipsleden over Drøbakerskelen.»

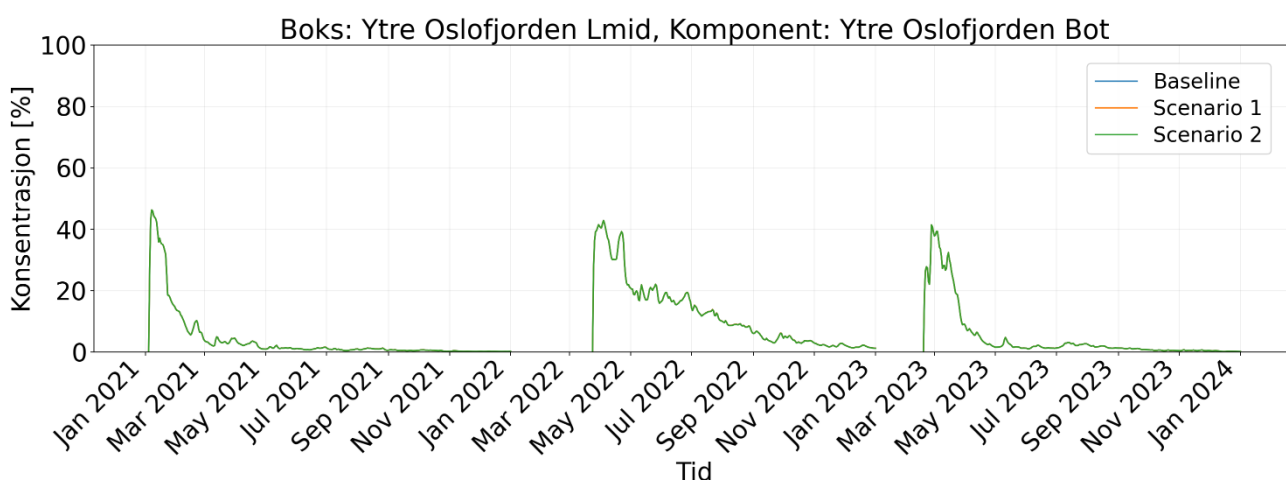
Vedlegg A Figurer

I dette vedlegget er det figurer som ikke kom med i hovedrapporten, men som fortsatt er av interesse.

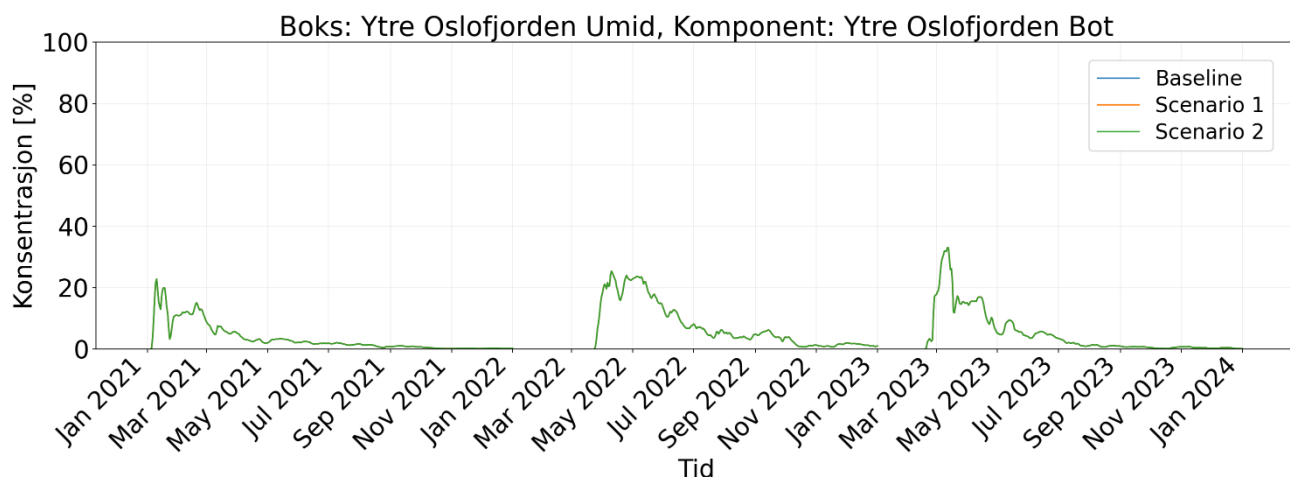
Vedlegg A.1 Massen av komponenten Ytre Oslofjorden Bot i de forskjellige boksene



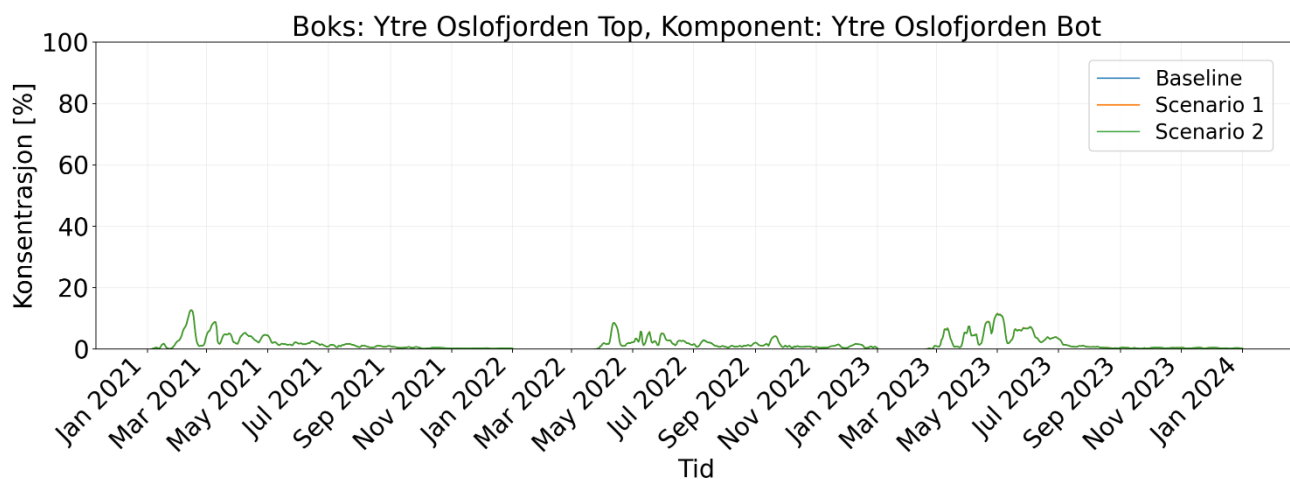
Figur A-1 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Ytre Oslofjorden Bot for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



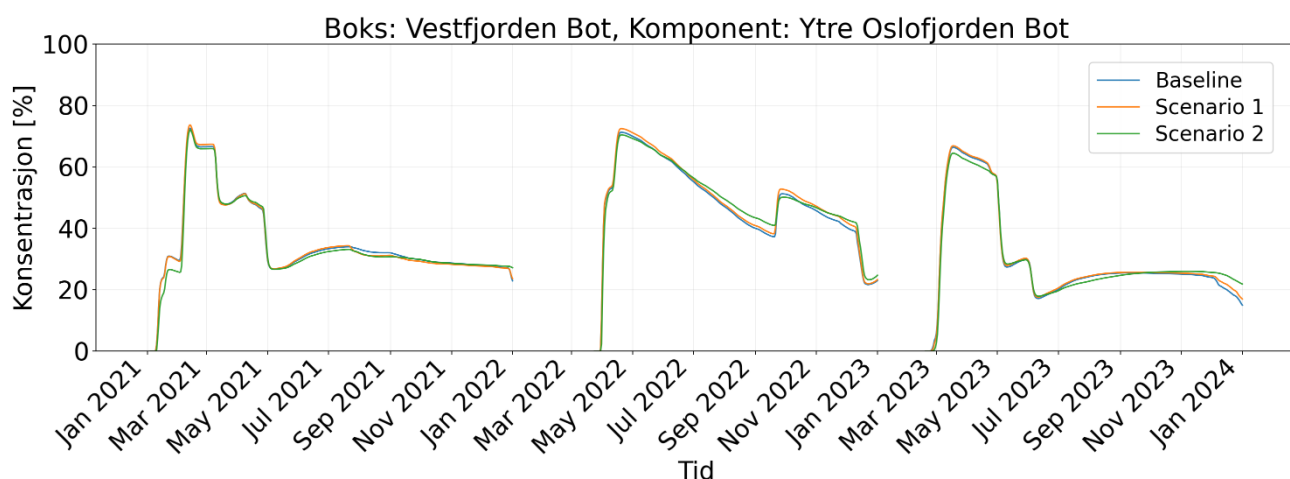
Figur A-2 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Ytre Oslofjorden Lmid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



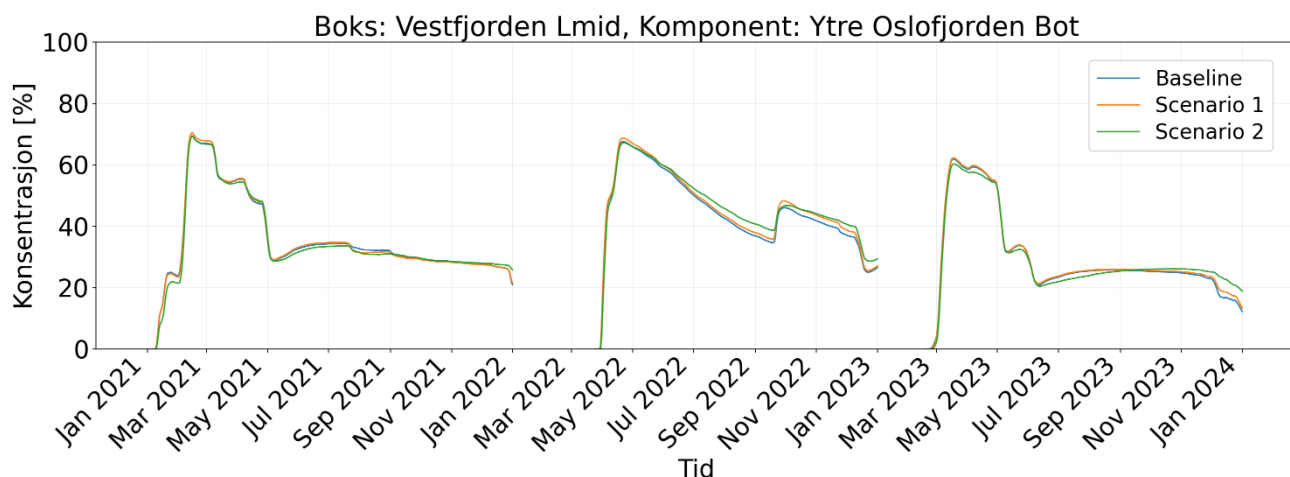
Figur A-3 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Ytre Oslofjorden Umid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



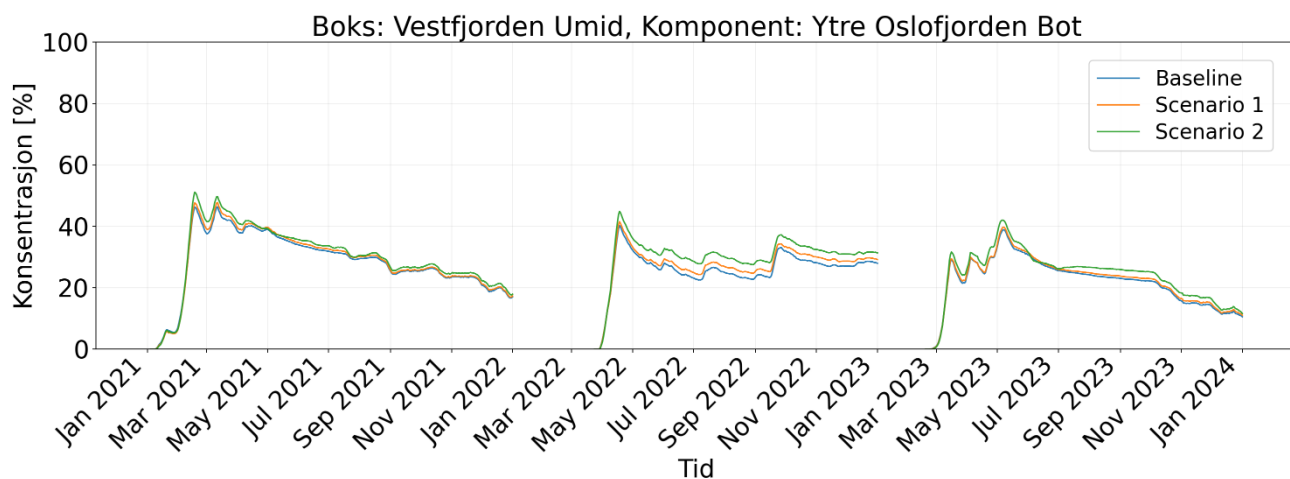
Figur A-4 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Ytre Oslofjorden Top for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



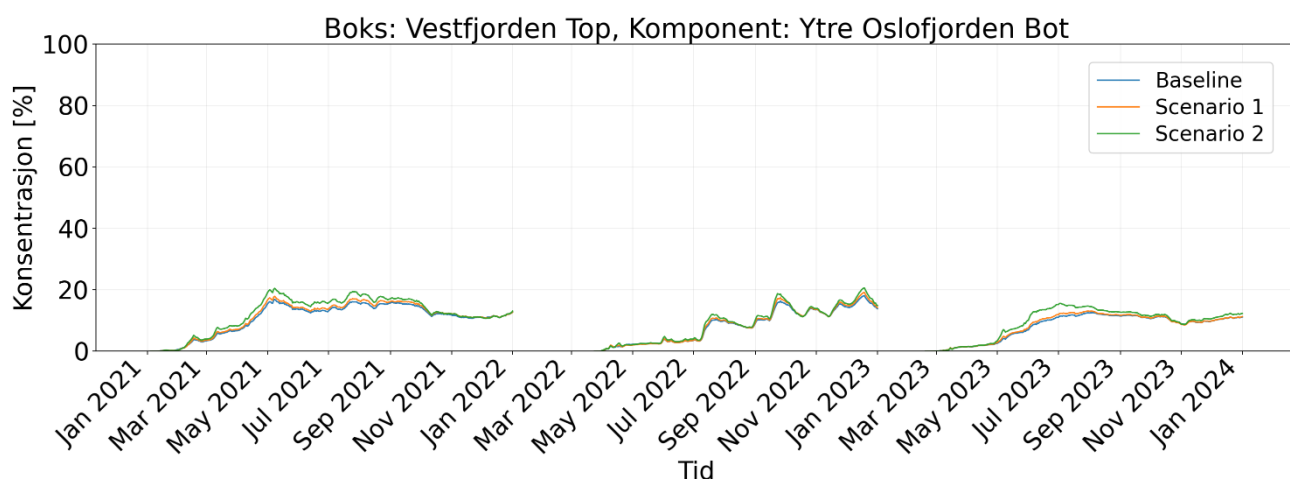
Figur A-5 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Vestfjorden Bot for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



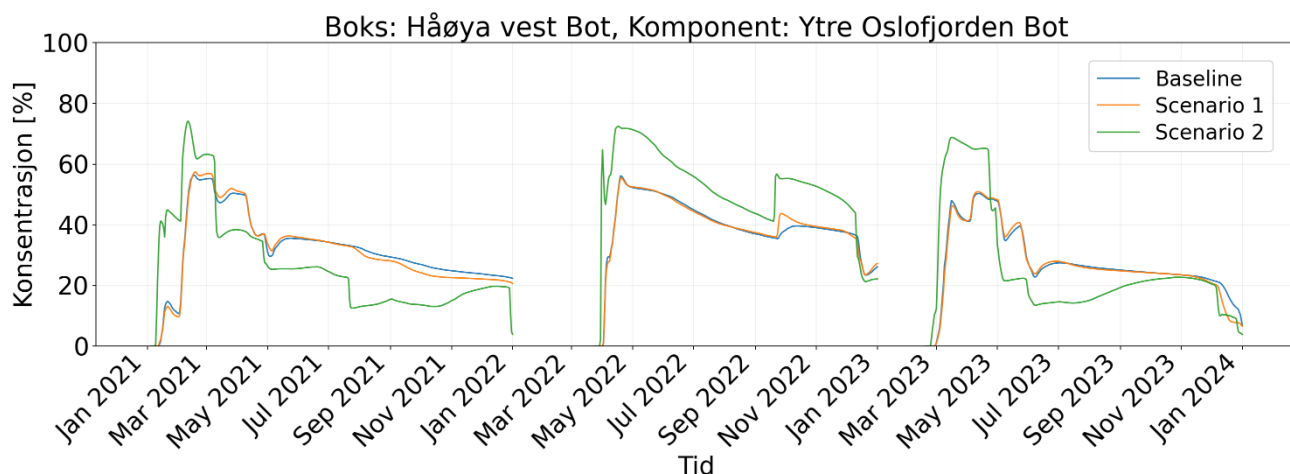
Figur A-6 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Vestfjorden Lmid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



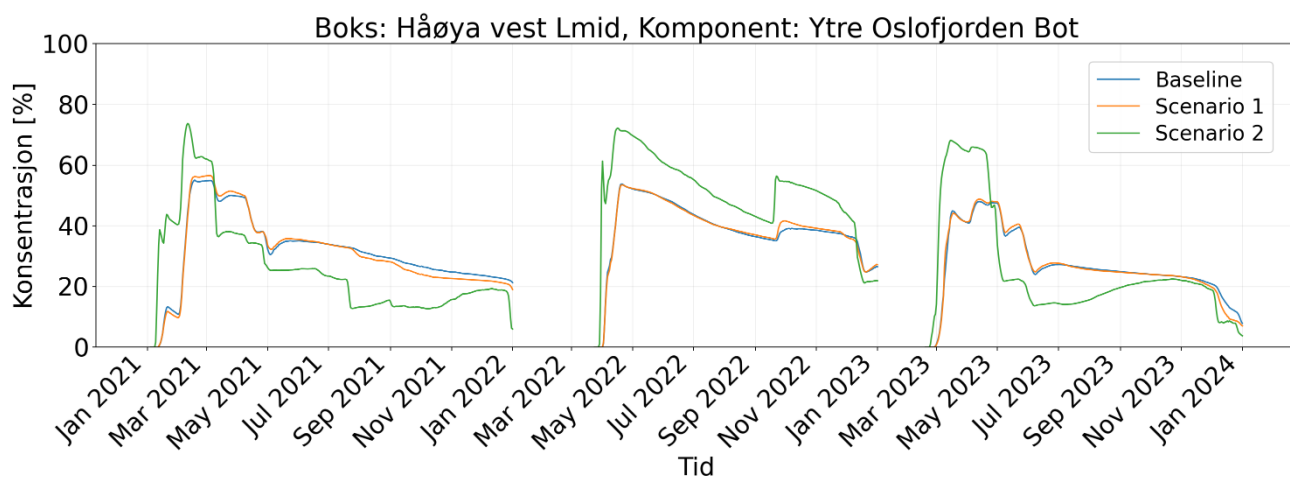
Figur A-7 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Vestfjorden Umid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



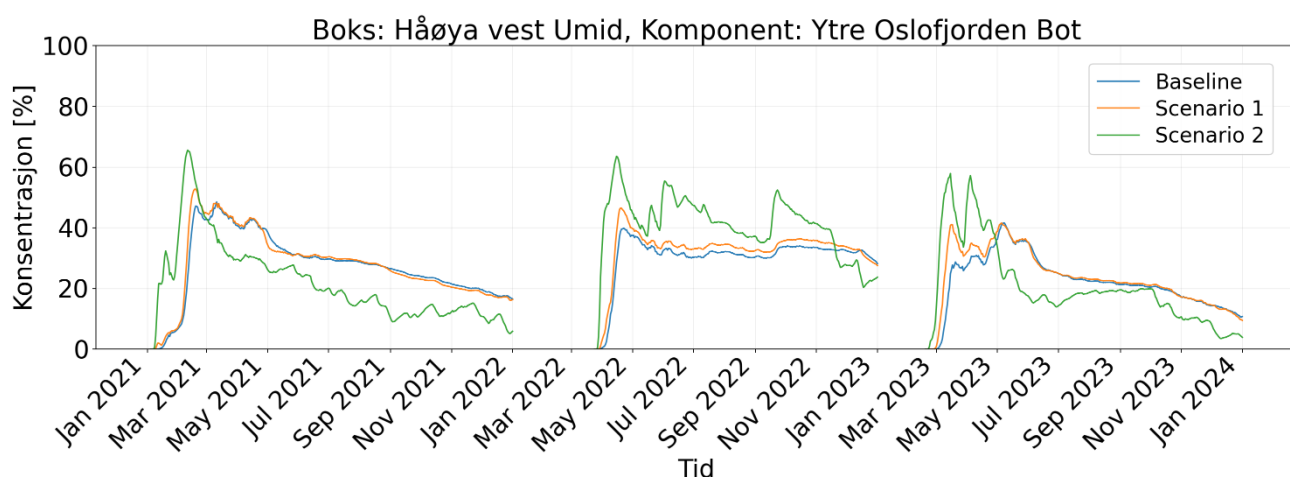
Figur A-8 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Vestfjorden Top for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



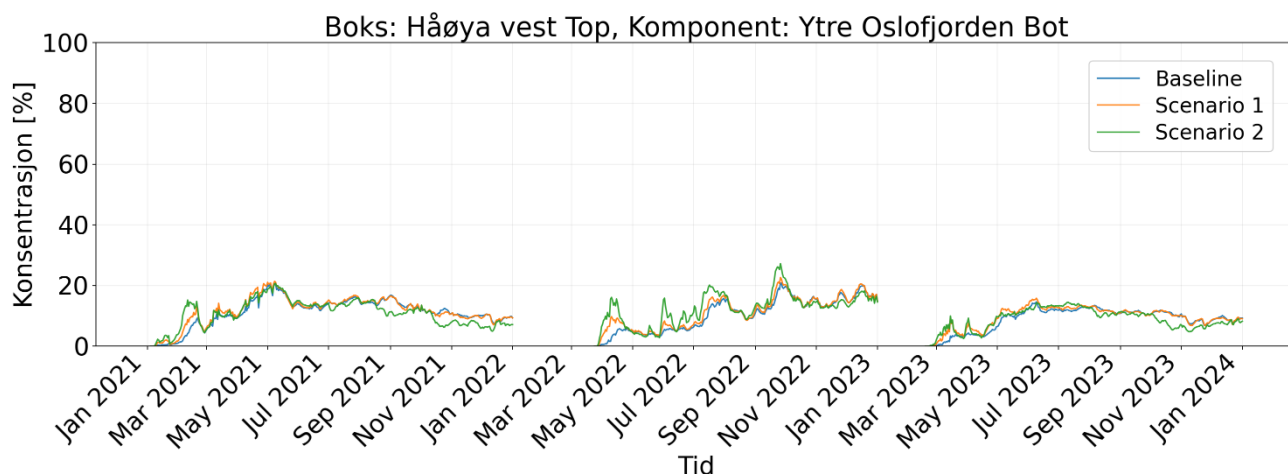
Figur A- 9 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Håøya vest Bot for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



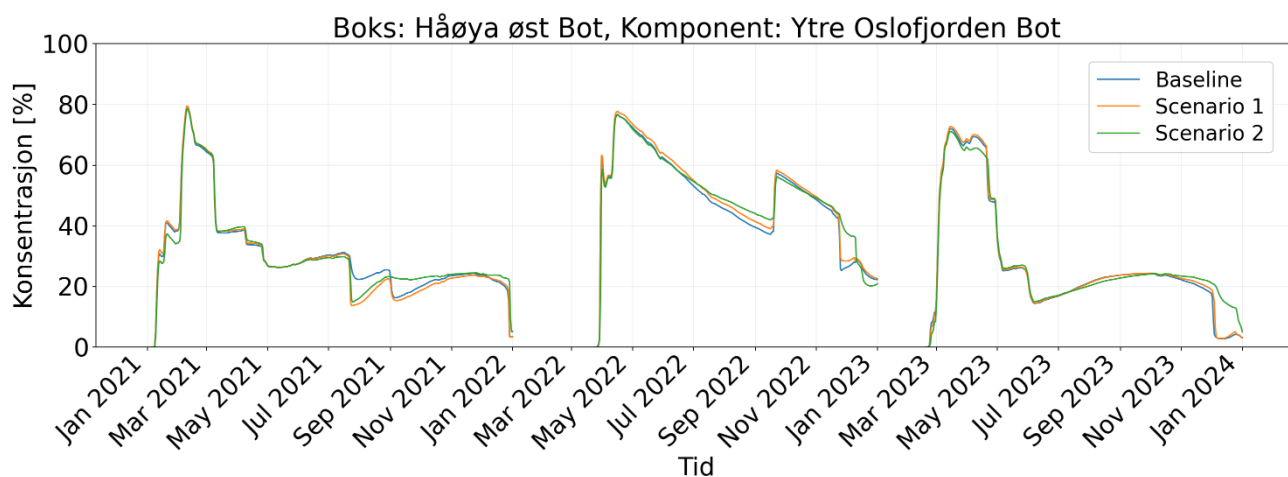
Figur A- 10 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Håøya vest Lmid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



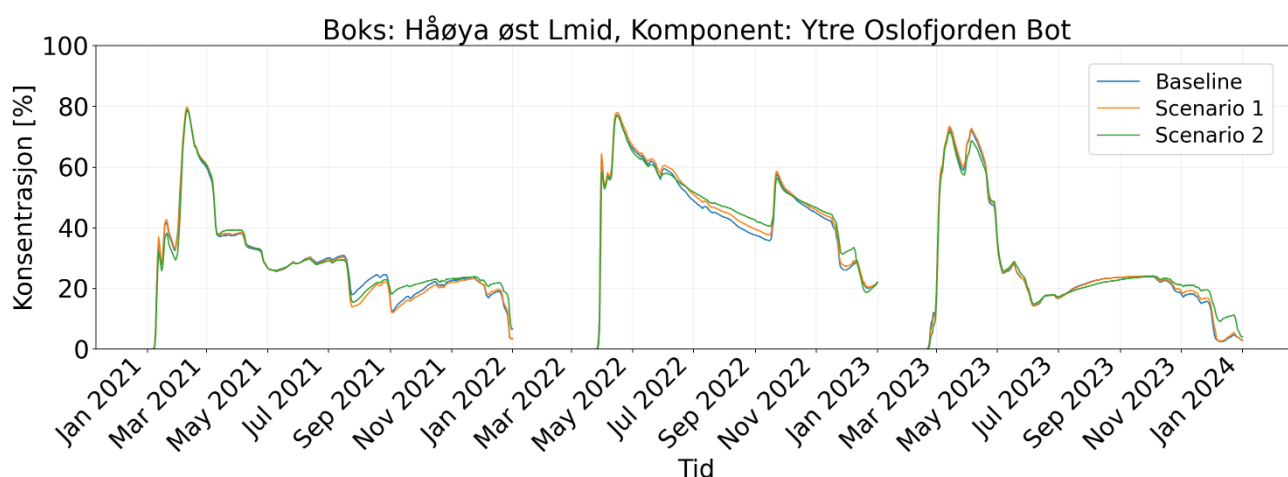
Figur A- 11 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Håøya vest Umid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



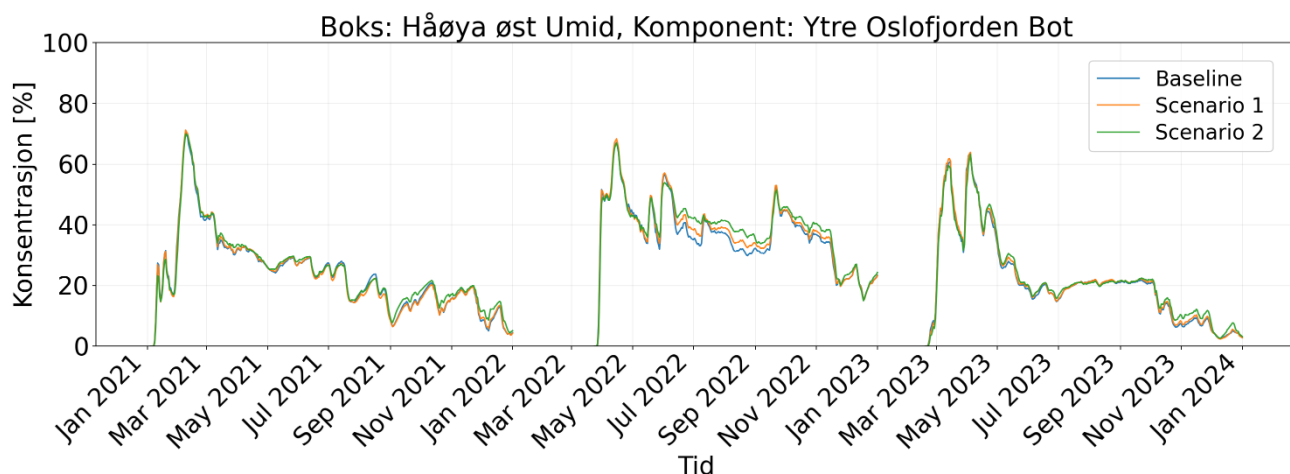
Figur A- 12 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Håøya vest Top for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



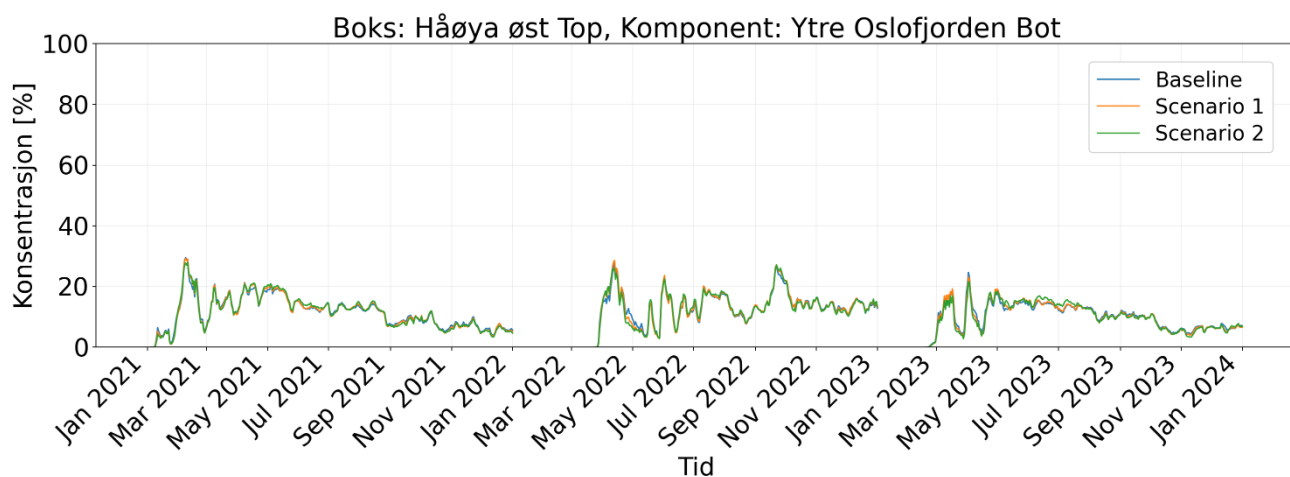
Figur A- 13 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Håøya øst Bot for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



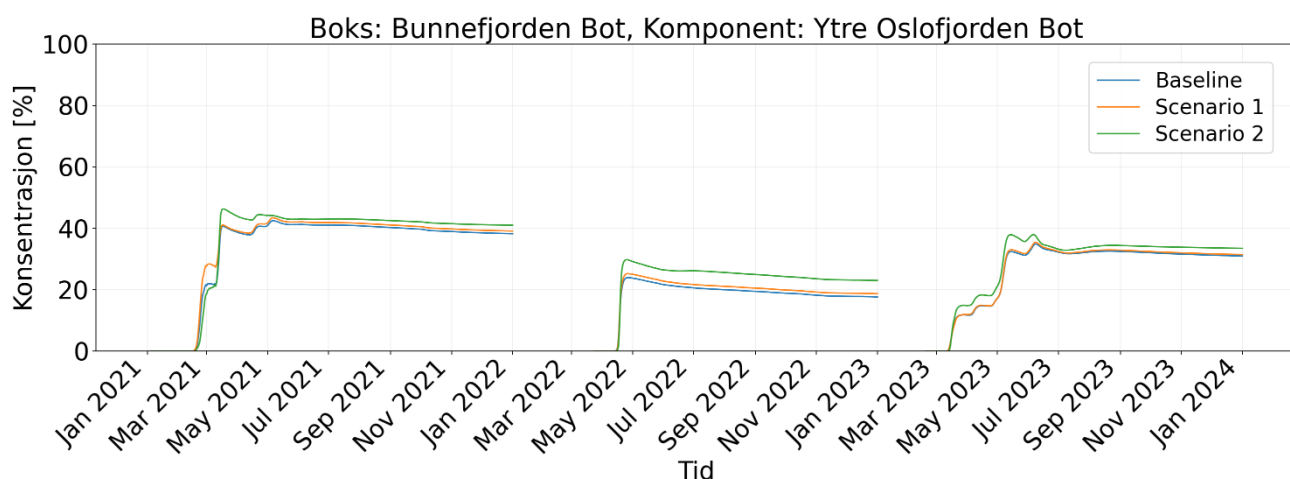
Figur A- 14 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Håøya øst Lmid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



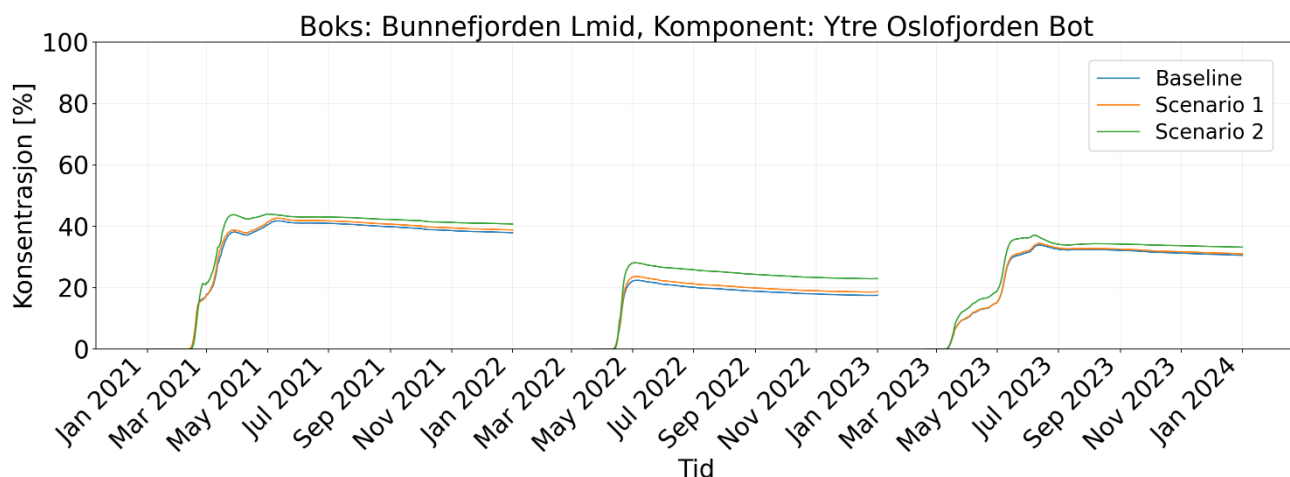
Figur A- 15 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Håøya øst Umid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



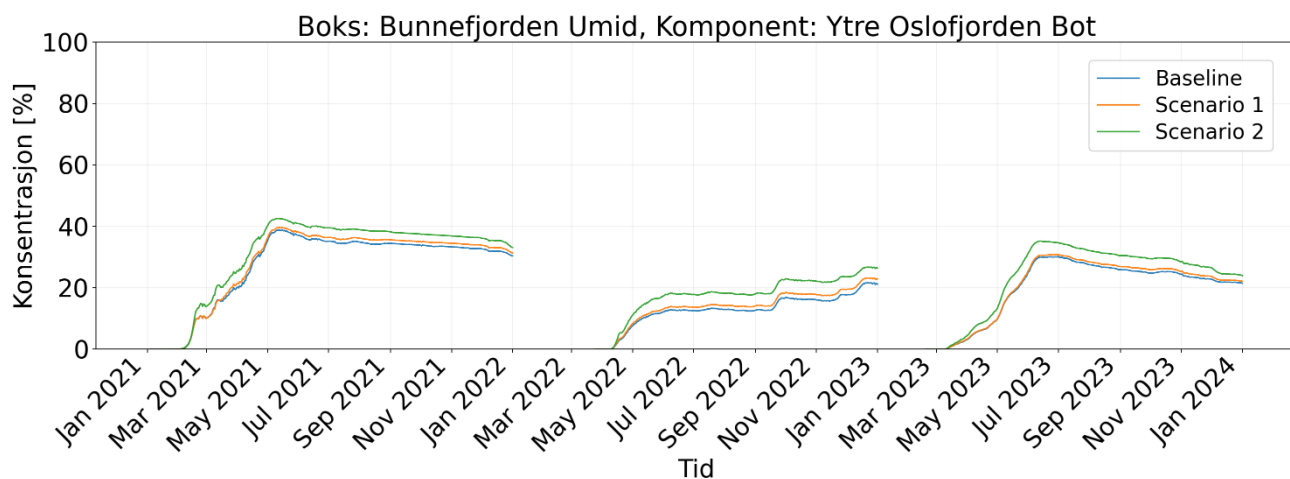
Figur A- 16 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Håøya øst Top for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



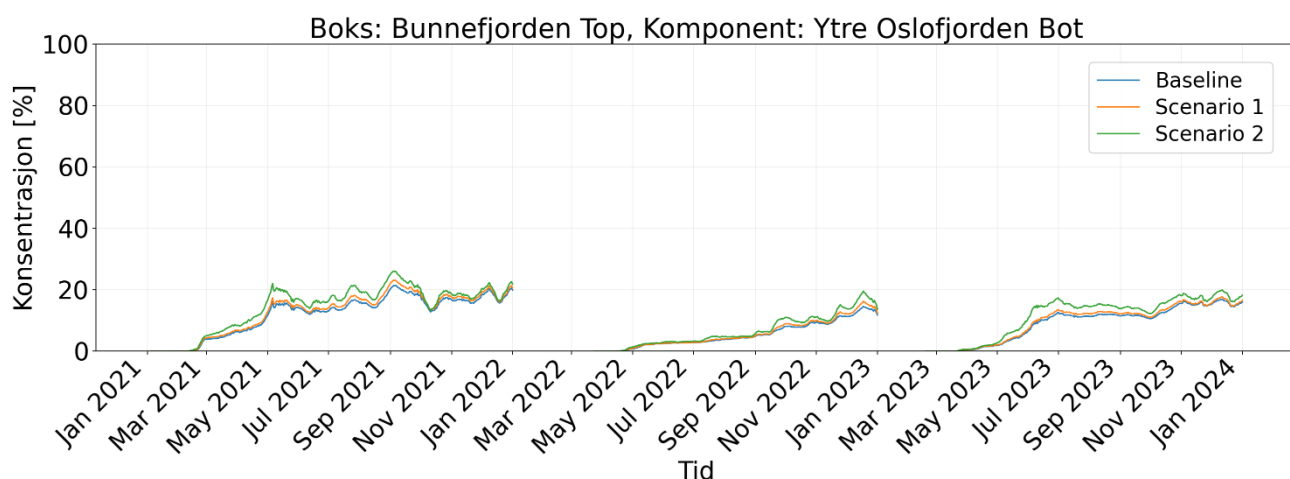
Figur A- 17 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Bunnefjorden Bot for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.



Figur A- 18 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Bunnefjorden Lmid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.

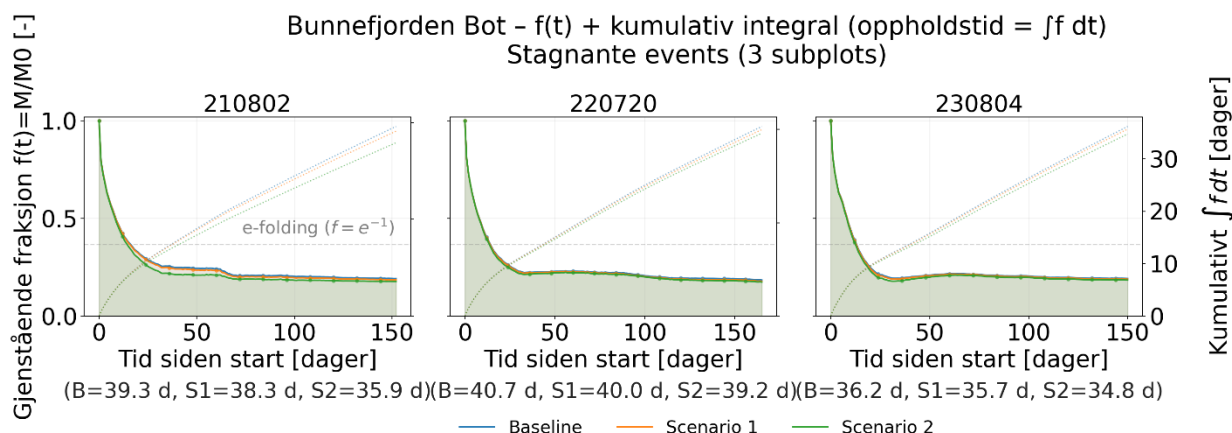


Figur A- 19 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Bunnefjorden Umid for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.

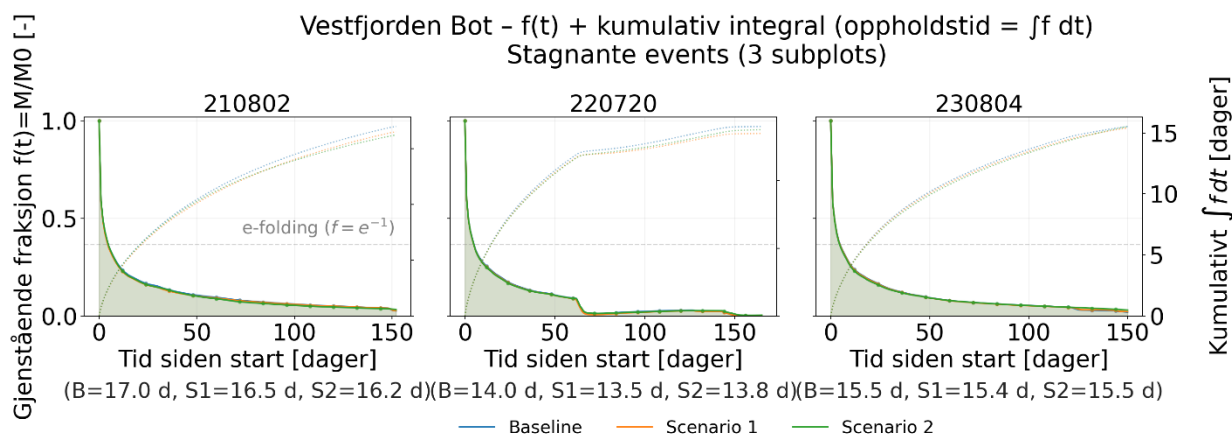


Figur A- 20 Massen av komponenten Ytre Oslofjord Bot i prosent i boksen Bunnefjorden Top for Baseline, Scenario 1 og 2. Her er alle de tre periodene inkludert i samme figur.

Vedlegg A.2 Tidsserier for boksviss utskiftningsperiode i stagnasjonsperiodene

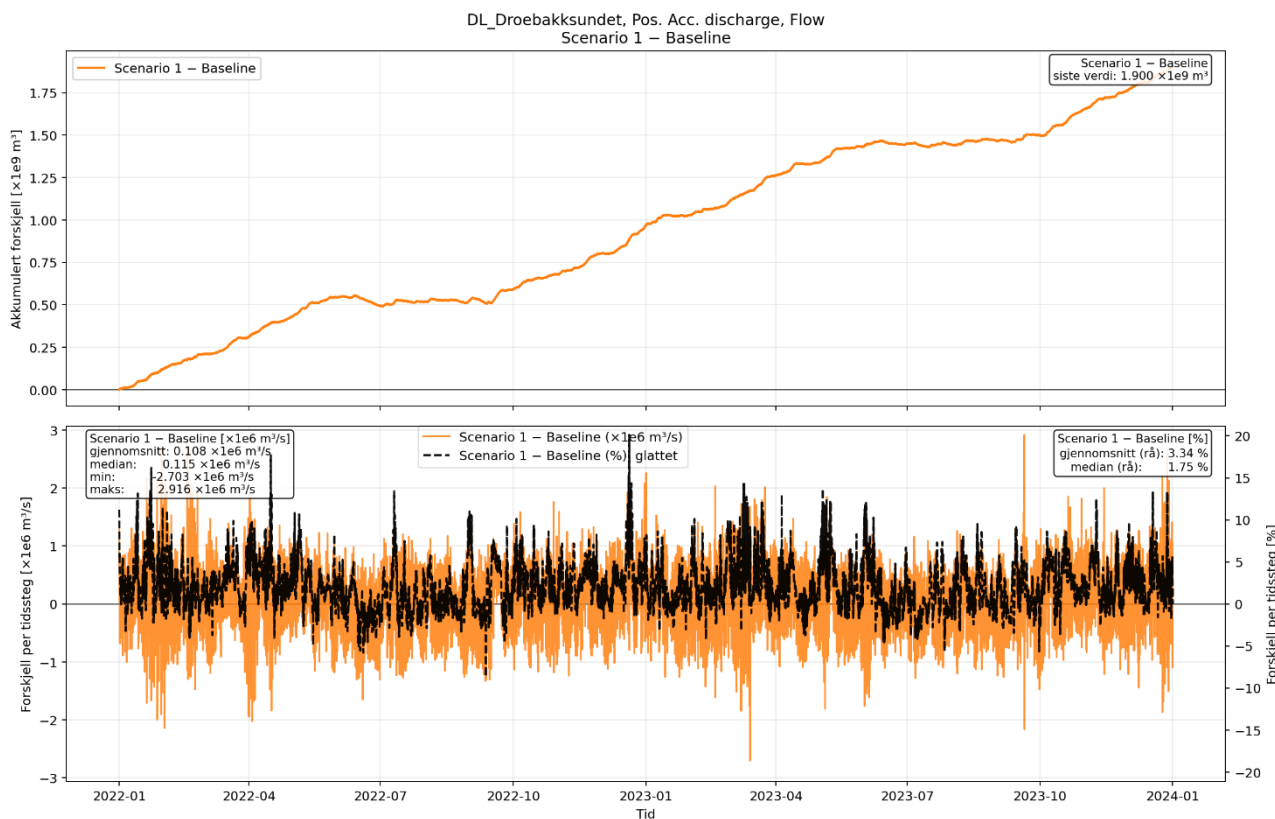


Figur A- 21 Tidsutviklingen av gjenstående fraksjon av sporstoff i bunnvannet i Bunnefjorden for tre stagnasjonsperioder, ett panel per periode, i Baseline og to scenarier. Boksviss utskiftningsperiode beregnes som arealet under kurven, og de oppgitte B/S1/S2-verdiene under hver figur er de resulterende verdiene i dager.

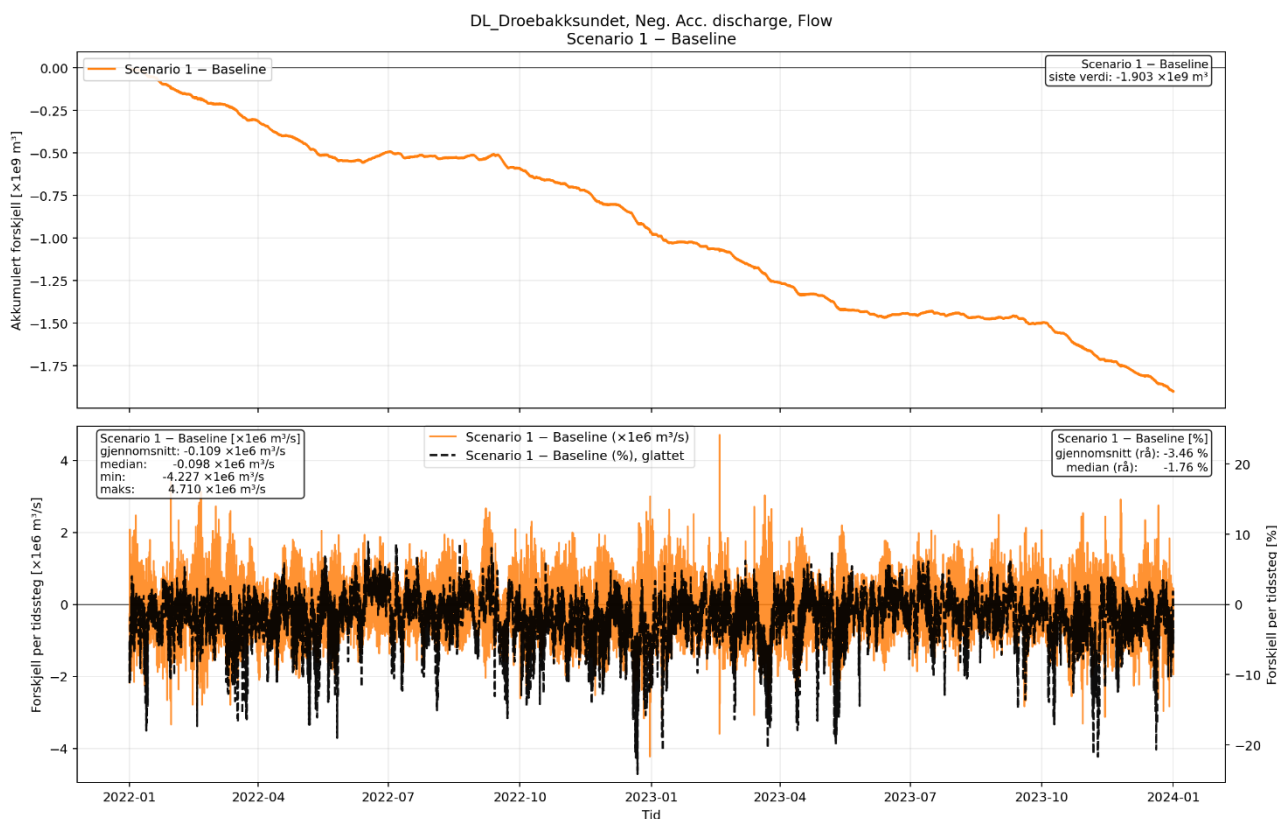


Figur A- 22 Tidsutviklingen av gjenstående fraksjon av sporstoff i bunnvannet i Vestfjorden for tre stagnasjonsperioder, ett panel per periode, i Baseline og to scenarier. Boksviss utskiftningsperiode beregnes som arealet under kurven, og de oppgitte B/S1/S2-verdiene under hver figur er de resulterende verdiene i dager.

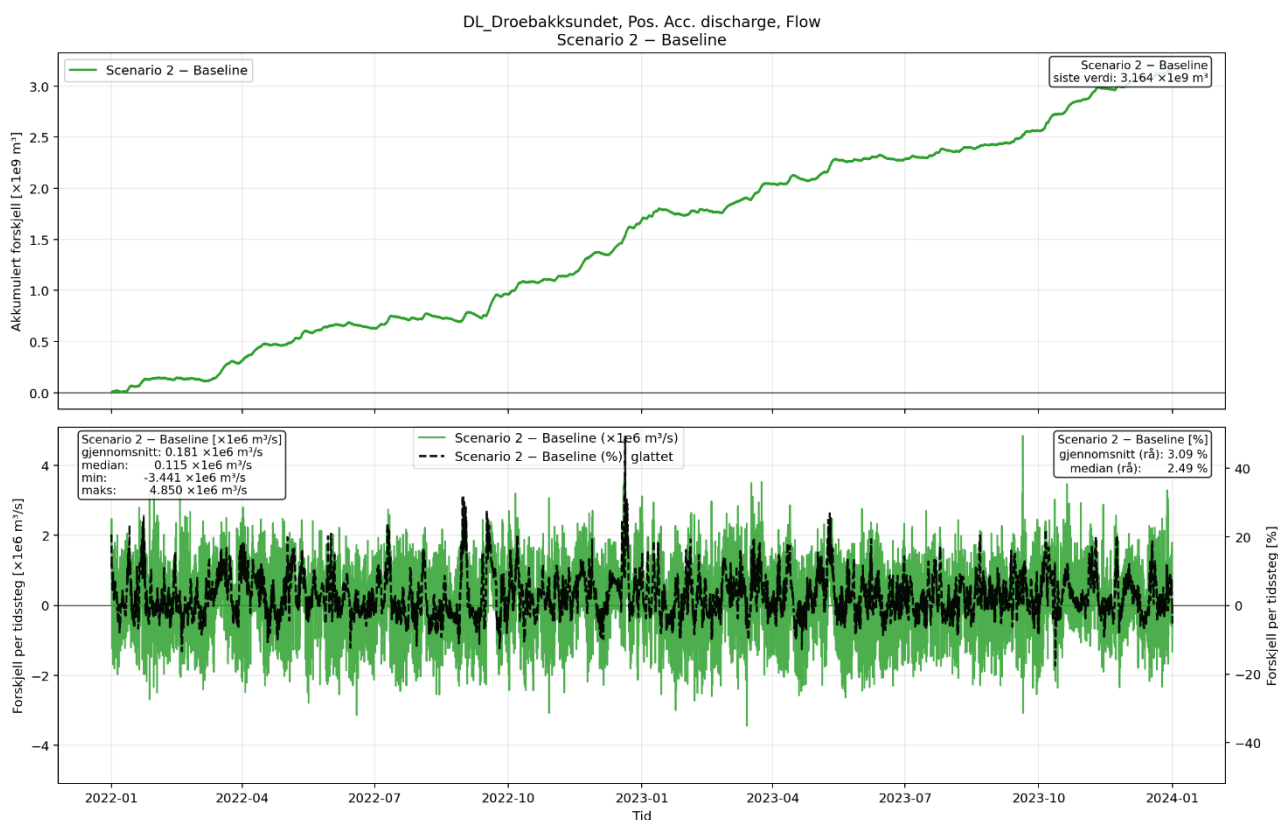
Vedlegg A.3 Tidsserier for differansene av både akkumulert volumtransport og volumtransport per tidssteg



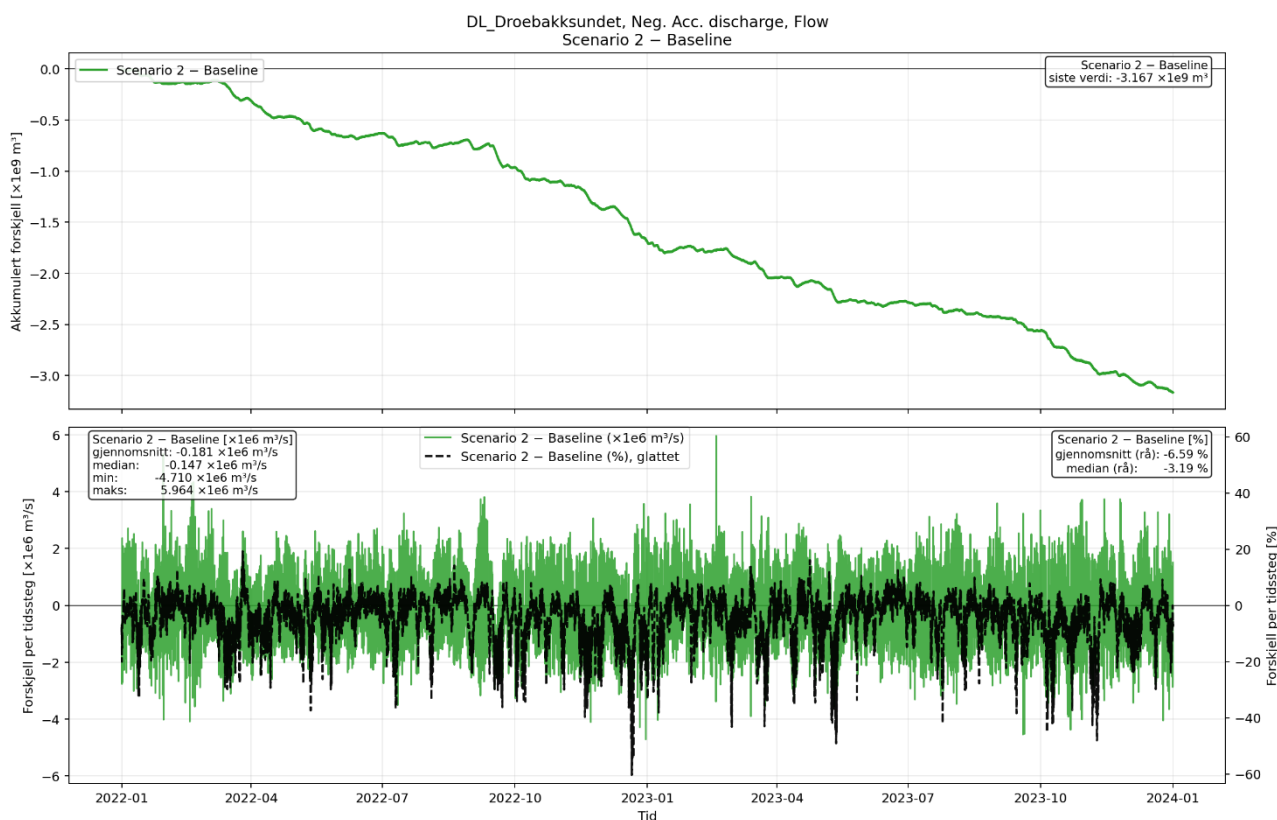
Figur A- 23 Differanse mellom Scenario 1 og Baseline for positiv akkumulert volumtransport gjennom Drøbakksundet i 2022 og 2023. Øvre panel viser akkumulert differanse i volumtransport, der mer positive verdier betyr større positiv akkumulert volumtransport i Scenario 1 enn i Baseline. Nedre panel viser differansen per tidssteg i volumtransport på venstre akse og prosentvis differanse relativt til Baseline på høyre akse. Den svarte kurven viser glattet prosentvis differanse.



Figur A- 24 Differanse mellom Scenario 1 og Baseline for negativ akkumulert volumtransport gjennom Drøbaksundet i 2022 og 2023. Øvre panel viser akkumulert differanse i volumtransport, der mer negative verdier betyr større negativ akkumulert volumtransport i Scenario 1 enn i Baseline. Nedre panel viser differansen per tidssteg i volumtransport på venstre akse og prosentvis differanse relativt til Baseline på høyre akse. Den svarte kurven viser glattet prosentvis differanse.



Figur A- 25 Differanse mellom Scenario 2 og Baseline for positiv akkumulert volumtransport gjennom Drøbaksundet i 2022 og 2023. Øvre panel viser akkumulert differanse i volumtransport, der mer positive verdier betyr større positiv akkumulert volumtransport i Scenario 2 enn i Baseline. Nedre panel viser differansen per tidssteg i volumtransport på venstre akse og prosentvis differanse relativt til Baseline på høyre akse. Den svarte kurven viser glattet prosentvis differanse.



Figur A- 26 Differanse mellom Scenario 2 og Baseline for negativ akkumulert volumtransport gjennom Drøbaksundet i 2022 og 2023. Øvre panel viser akkumulert differanse i volumtransport, der mer negative verdier betyr større negativ akkumulert volumtransport i Scenario 2 enn i Baseline. Nedre panel viser differansen per tidssteg i volumtransport på venstre akse og prosentvis differanse relativt til Baseline på høyre akse. Den svarte kurven viser glattet prosentvis differanse.