

BERGEN KOMMUNE

MODELLERING AV VANNUTSKIFTNING I PUDDEFJORDEN

FAGRAPPOR



Dokumentinformasjon

Tittel:	Modellering av vannutskiftning i Puddefjorden		
COWI-kontor:	Bergen		
Oppdrag nr:		Rapportnummer	
Utgivelsesdato:	15.06.2023	Antall sider:	20
Tilgjengelighet:	Åpen	Antall vedlegg:	-
Utarbeidet:	ARBV, GEDM	Sign.	
Kontrollert:	GEDM, AVSU	Sign.	
Godkjent:	BCKV	Sign.	
Oppdragsgiver:	Bergen kommune	Oppdragsgivers kontaktperson:	Vegard. A. Vattle
Stikkord:	Vannutskiftning, Strømning, Utfylling, Bølger		

INNHOOLD

Sammendrag	4
1 Innledning	5
1.1 Metode	6
2 Vannstandsmålinger	6
3 Modell	9
3.1 Generelt	9
3.2 Beregningsnett og dybde	9
3.3 Kalibrering	11
4 Resultater vannutskiftning	14
4.1 Fremtidig situasjon	14
4.2 Strømbilder	16
4.3 Vannutskiftning Store Lungegårdsvann	17
4.4 Vannutskiftning buktene	18
4.5 Diskusjon effekt stratifisering	18
5 Bølger	18
6 Konklusjon	19
7 Referanser	20

Sammendrag

I denne rapporten har vi sett på den kumulative effekten av fire store planlagte utfyllinger i sjø i Bergen på strømningsforhold og vannutskiftning i området

En hydrodynamisk modell som ble kalibrert ved hjelp av vannstandsmålinger i Byfjorden og Store Lungegårdsvann ble kjørt med dagens situasjon og en framtidig situasjon med de fire planlagte utfyllingene på plass (Dokken, Laksevågneset, Laksevåg Verft og Damgårdsveien). Forskjellen mellom de to scenariene i vannutskiftning var marginal og dermed ubetydlig. Det konkluderes derfor med at vannutskiftningen i Store Lungegårdsvannet, Damgårdssundet, Puddefjorden og de forskjellige buktene ikke blir påvirket i negativ retning.

Generelt sett vurderes bølgeforldene i Puddefjorden til å bli bedre enn i dagens situasjon på grunn av skyggevirking av utfyllingene. Det er en premiss at bølger ikke reflekterer (mye) mot utfyllingene. Særlig vertikale kaier/murer kan reflektere bølger. Det anbefales å se nærmere på bølgeforld i alle planene når mer detaljer er kjent.

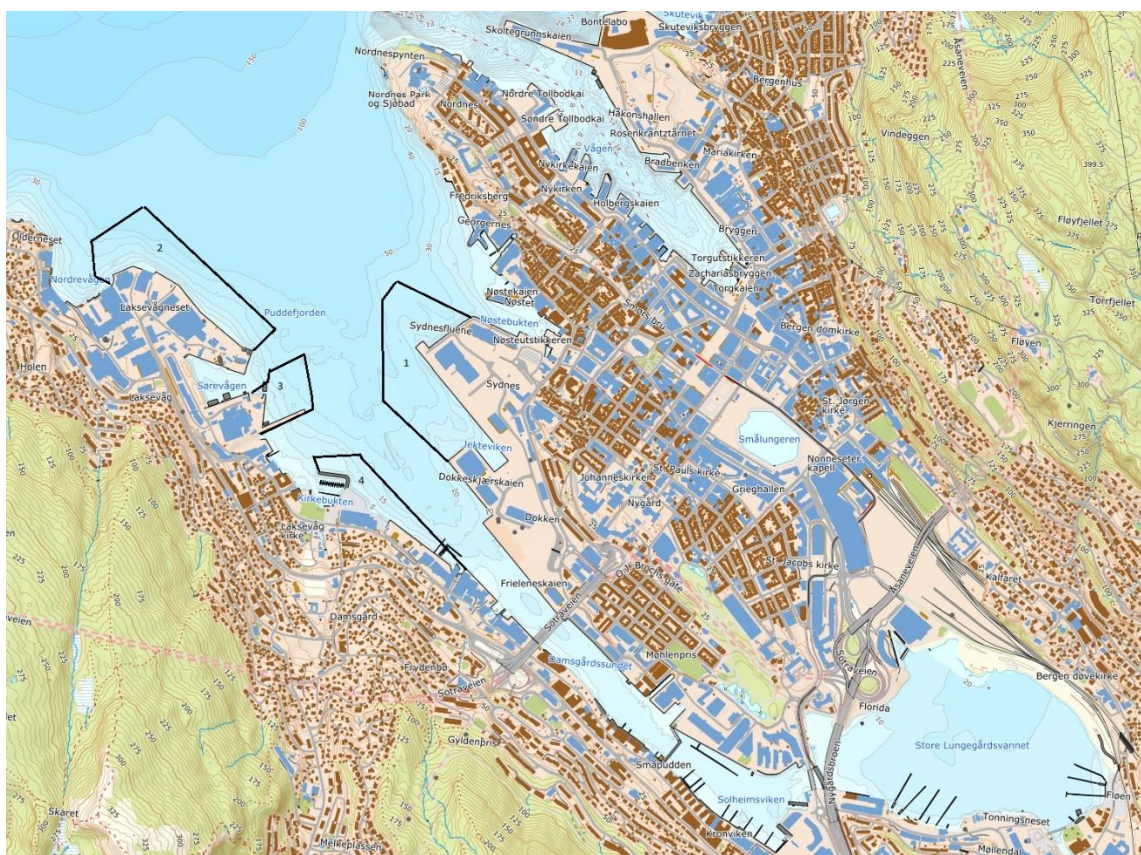
1 Innledning

I Bergen er det forskjellige planer for store utfyllinger i sjø i Puddefjorden og Damgårdssundet (Figur 1). Det handler om Dokken, Laksevågneset, Laksevåg Verft og Damgårdsveien, se Figur 1. De fleste tema som omhandler ekspansjon/utfylling i sjø kan utredes i den enkelte reguleringsplan, men det er behov for å vurdere noen tema overordnet når en ser på ekspansjon/utfylling i sjø langs sjøfronten. Denne utredningen skal vurdere temaene strømningsforhold og vannutskiftning helhetlig på tvers av alle de pågående offentlige og private planene.

Det er behov for en vurdering av de akkumulerte effektene som de potensielle/planlagte utfyllingene langs Puddefjorden vil ha på strømningsforholdene i området. Analyseområdet omfatter hele vannflaten fra Byfjorden til Store Lungegårdsvann.

Denne rapporten skal vurdere følgende spørsmål:

- › Det skal undersøkes om utfyllingene vil påvirke strømningsforhold og bølger.
- › Det skal undersøkes om vannutskiftningen i Puddefjorden, Damgårdssundet, Solheimsviken og Store Lungegårdsvann og de forskjellige buktene (Kirkebukten, Søreivågen, Nordevågen, Nøstebukten) kan bli redusert som følge av utfyllingene.



Figur 1 Oversiktskart Puddefjorden, Damgårdssundet og Store Lungegårdsvannet. Fremtidige utfyllinger indikert med svart linje (omtrent). 1 = Dokken; 2 = Laksevågneset; 3 = Laksevåg Verft; 4 = Damgårdsveien.

1.1 Metode

Det brukes en todimensjonal modell, MIKE21 (Flexibel Mesh), til beskrivelse av hydrodynamikken (HD). Den 2-dimensjonale modellen gir et første inntrykk av hvor mye vannutskiftningen blir endret pga. endrede bunnforhold/utfylling. Grunnere forhold fører til mer friksjon i Puddefjorden og kan begrense

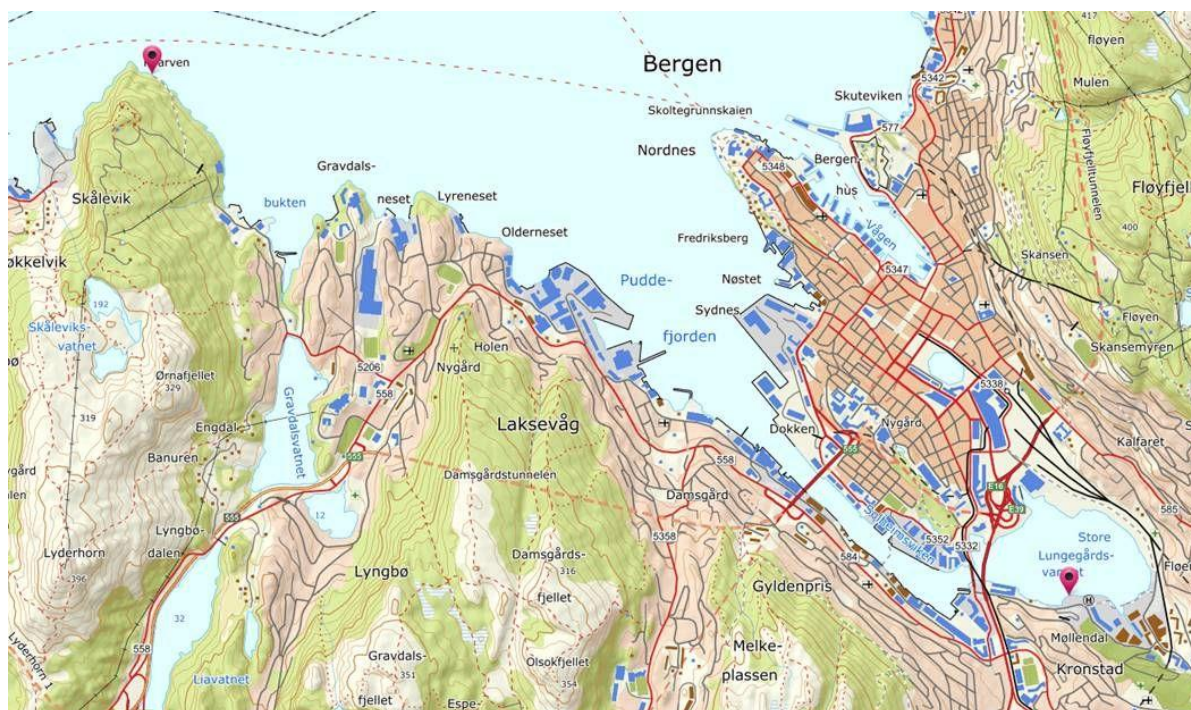
hvor mye vann som kommer inn og ut av Damsgårdsundet. For å kunne kalibrere modellen på ruhetsverdier, ble det utført vannstandsmålinger i den indre og ytre delen. Vi forventer at det er en vannstands og fase forskjell mellom disse to punktene, som igjen kan brukes til å kalibrere modellen for dagens situasjon.

Modellen blir kjørt for 0-alternativet (dagens situasjon), og et utfyllingsalternativ hvor alle utfyllingene er inkludert. Forskjellen mellom disse modellkjøringene gir innsikt i hvor mye vannutskiftningen endrer seg.

Vi vurderer effekten av stratifiseringen i området på strømming i Puddefjorden/Store Lungegårdsvann basert på faglig skjønn. Videre vurderer vi kvalitativt hva utfyllingsalternativene vil ha å si for bølgeforhold (uten modellering).

2 Vannstandsmålinger

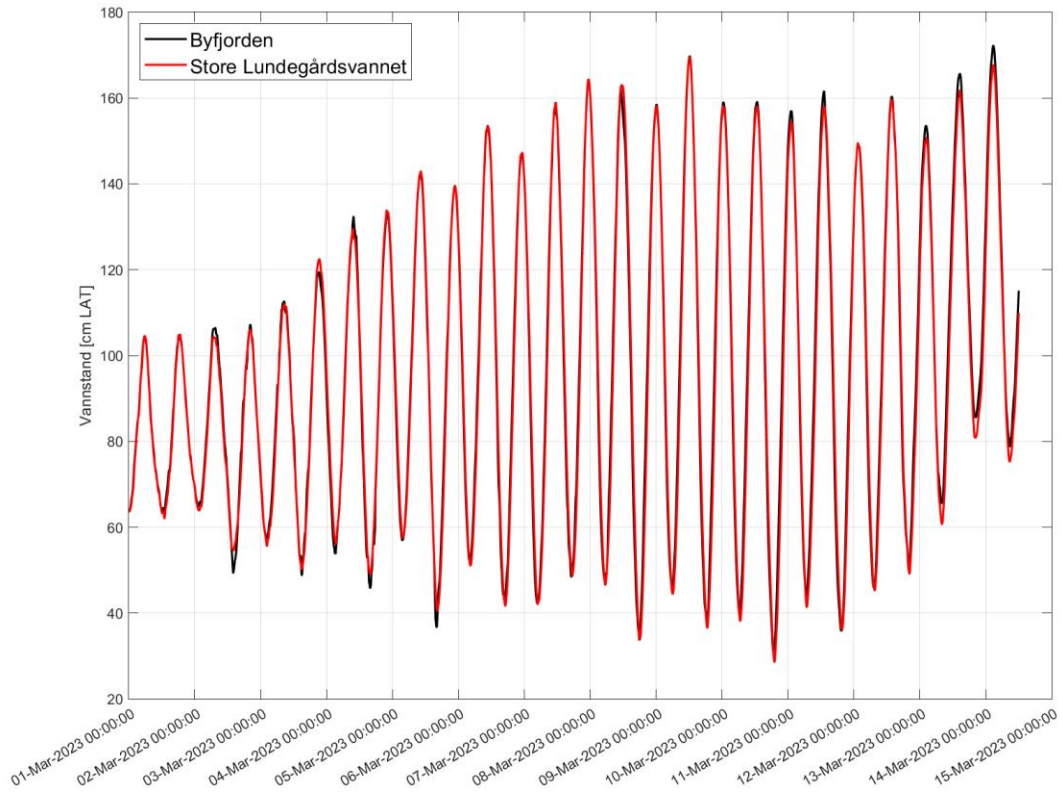
Det ble installert to trykksensorer (type DIVER) i Store Lungegårdsvannet og i Byfjorden (Figur 2). Målt trykk ble deretter kompensert med lufttrykkmålinger, slik at målt trykk kan konverteres til målt vannstand.



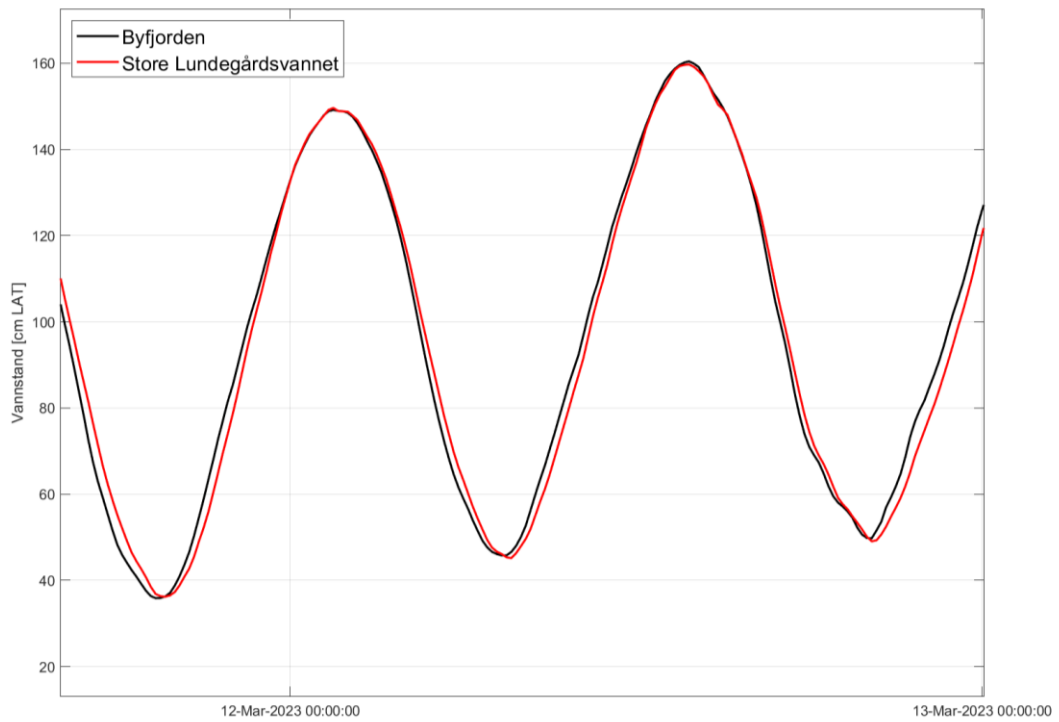
Figur 2 Lokasjoner vannstandsmålinger. Ytre vannstandsmåler ble innstallert rundt Knarven, på sørsiden av Byfjorden. Indre vannstandsmåler ble innstallert på sørsiden av Store Lungegårdsvannet.

Resultatet vises i Figur 3. Vi ser tydelig at vannstand er dominert av tidevannet som kommer 2 ganger daglig. Videre ser vi over 14 dagers perioden en nipp-spring periode (høyere høyvann og lavere lavvann i springflo perioden). Forskjellen i vannstand mellom Byfjorden og Store Lungegårdsvannet er begrenset til noen cm.

Det oppstår en liten faseforskjell på lavvann (Figur 4). Lav vannstand i indre delen (Store Lungegårdsvannet) kommer ca. 15 minutter senere enn i Byfjorden. På høyvann ser man ikke denne faseforskjell. Det forklares med at lavere vannstand fører til mer friksjon enn høy vannstand og dermed blir tidevannet bremsset.



Figur 3 Observert vannstand i periode 1. mars -15. mars 2023 i Byfjorden og Store Lungegårdsvannet.



Figur 4 Obsert vannstand i periode rundt 12. mars 2023 i Byfjorden og Store Lungegårdsvannet.

3 Modell

3.1 Generelt

Det brukes en tredimensjonal modell, MIKE21 (Flexibel Mesh), til beskrivelse av hydrodynamikken (HD). I dette kapitlet beskrives oppsett og kalibrering av hydrodynamikkmodellen (HD) som brukes videre til simulering av effekten av utfyllingene (neste kapitler).

HD modellen i MIKE21 er en "state of the art" numerisk strømningsmodell, som basert på de fysiske forholdene kan beskrive både steds- og tidsmessige variasjoner i vannstand og strømhastigheter. Der er valgt å anvende en 2D-modell, da fylling og tømning av tidevannet i Store Lungegårdsvannet gjennom Puddefjorden er den dominerende prosessen for vannutskiftning. Denne prosessen beskrives godt av en 2D modell. Store Lungegårdsvannet er derimot stratifisert, det vil si at det er mer saltholdig vann i bunnvannet og mer brakkvann i topplaget. Dette er en 3D hydrodynamisk prosess, men det styrer ikke den daglige vannutskiftningen i Puddefjorden.

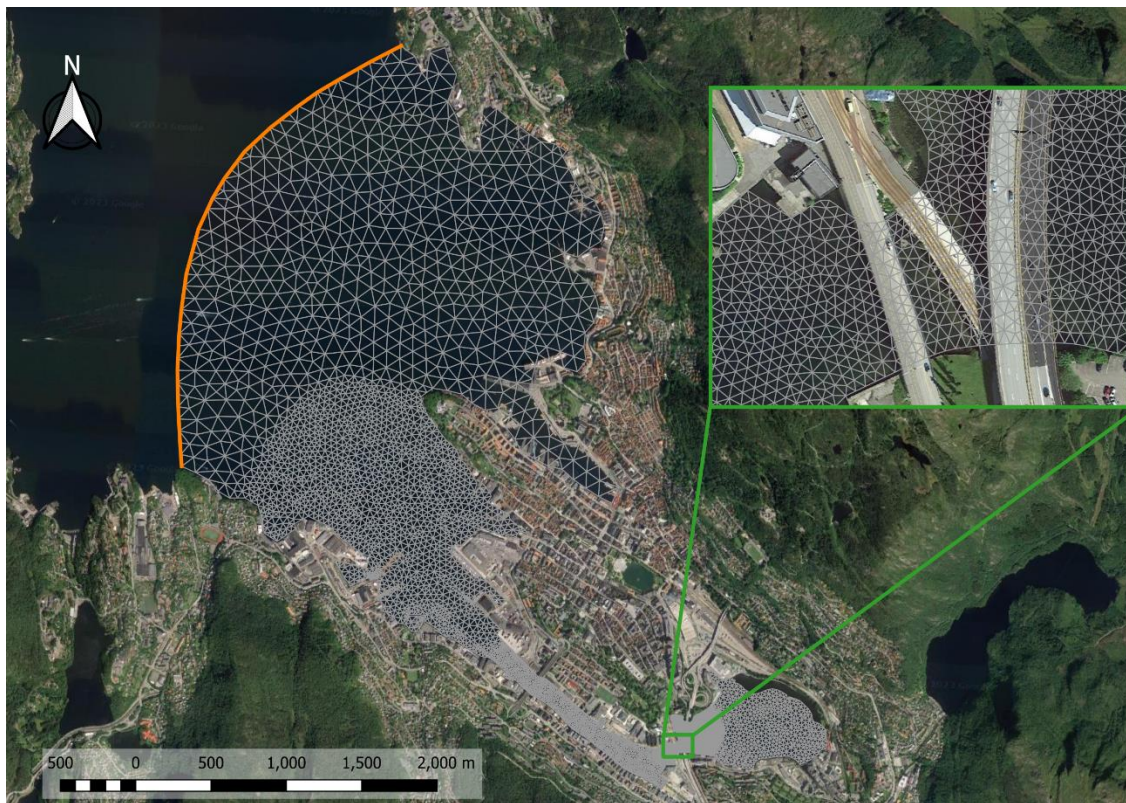
HD-modellen for området vil baseres på tilgjengelig batymetri (dybdeforhold). Modellen settes opp fra Byfjorden inn til Store Lungegårdsvann. Målte vannstandsdata i Byfjorden i mars 2023 vil danne grunnlag for input til modellens vannstand på sjøgrensen. Modellen kalibreres med målt vannstand ute og inne i Store Lungegårdsvannet.

MIKE21 er en modell laget av DHI (Danish Hydraulic Institute), og blir mye brukt internasjonalt. Vi refererer til DHI (2020) for videre informasjon om modellen.

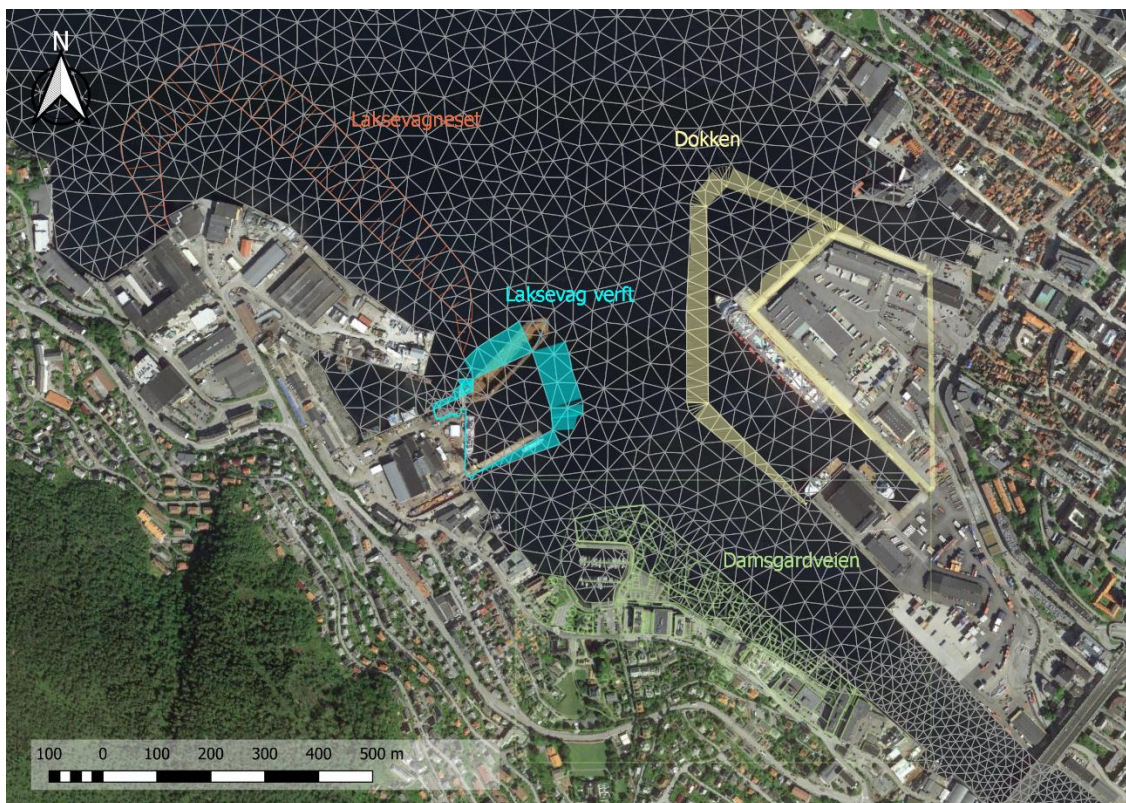
3.2 Beregningsnett og dybde

Beregningsnett omfatter Byfjorden til Store Lungegårdsvannet (Figur 5 og Figur 6). Lengden av modellen er ca. 6 km, og maksimal oppløsning i modellen er omtrent 5 m rundt Nygårdsbroen. Antall punkt i modellen er 6179, og antall trekanter er 11,508.

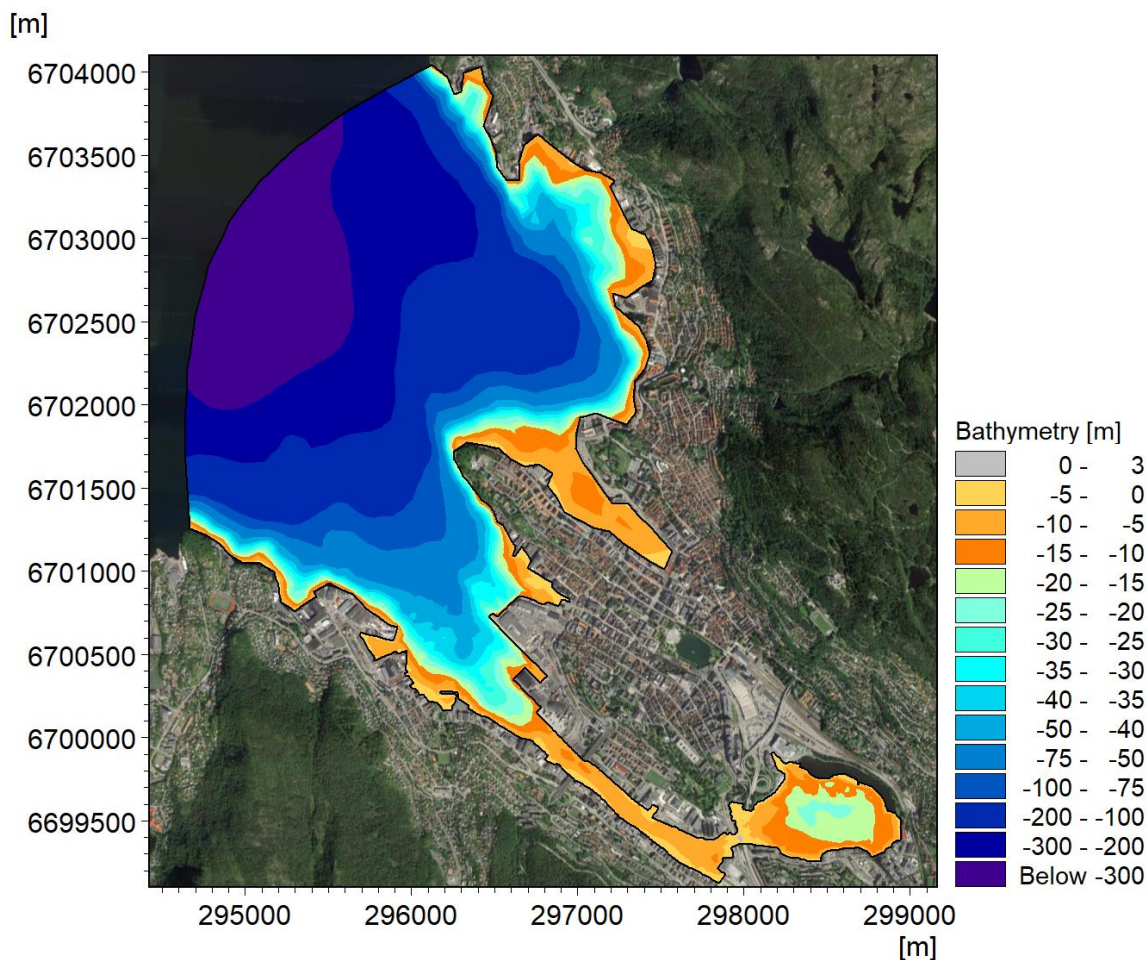
Dybden i modellen (Figur 7) er basert på multistråle ekkolodd-målinger utført i 2022 av Nearshore Survey (Nearshore Survey, 2022) av Puddefjorden og Store Lungegårdsvannet. Ute i fjorden ble dybdedata fra Kartverket brukt med oppløsning på 50 m.



Figur 5 Beregningsnett Bergen.



Figur 6 Detalj beregningsnett rundt utfyllingslokasjoner. Beregningsnett følger polygoner av utfyllingsområder



Figur 7 Dybder i modellen. Dybdedata i Puddefjorden og Store Lungegårdsvannet er fra Nearshore Survey (2022). Kartverket sine dybdedata er benyttet ute i Byfjorden.

3.3 Kalibrering

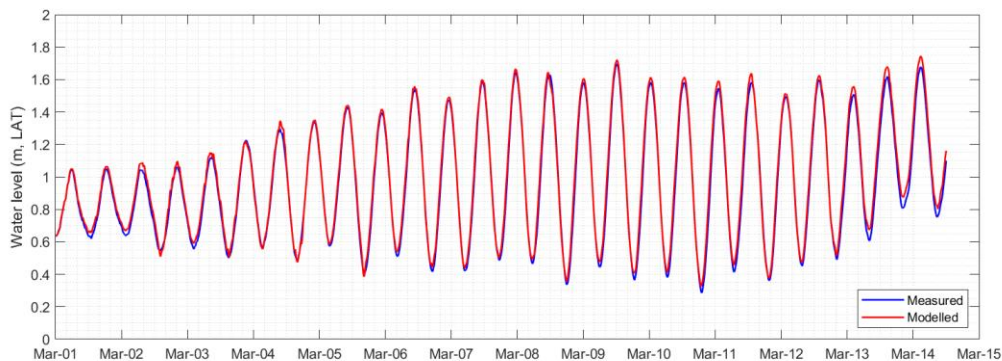
Modellen ble kjørt med målt vannstand i Byfjorden som grensebetingelse på sjøgrensen i modellen. Kalibrering av modellen har som mål å reprodusere observerte vannstander i Store Lungegårdsvannet så godt som mulig.

Innstillinger i modellen er gitt i Tabell 3-1.

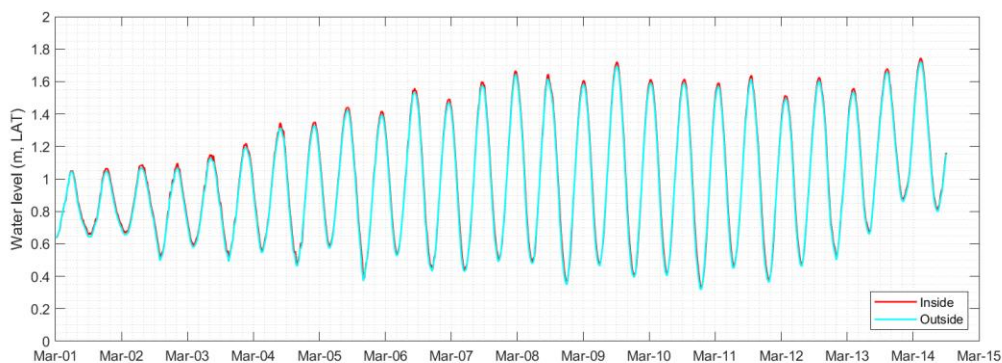
Tabell 3-1 HD-parametere i modellen.

Parameter			Enhet
Basisligninger	Shallow water equations		
Drying/wetting	Drying	<0,005	m vannstand
	Wetting	>0,1	m vannstand
Densitet	Barotropisk		
Horisontal Eddy Viskositet	Smagorinsky formulasjon	0,5	m ² /s
Friksjonsverdi	Manning	32	
Bropilarer skjematisk som subgrid elementer i modellen	Total: 24 pilarer. 14 pilarer rektangulær østlige bro. 6 runde vestlige bro (1m diameter). 4 rektangulære pilarer midtre bro		

Figur 8 viser modellert og observert vannstand i Store Lungegårdsvannet. Generelt sett kan modellen reprodusere vannstander veldig godt. Avvik er generelt sett i størrelsesorden av noen cm og kan forklares med f.eks. lokal vind som kan stuve opp vann litt. Det er generelt sett liten forskjell i vannstand mellom Byfjorden og Store Lungegårdsvannet i modellen (Figur 9), noe som samsvarer med vannstandmålingene (Figur 3 og Figur 4).

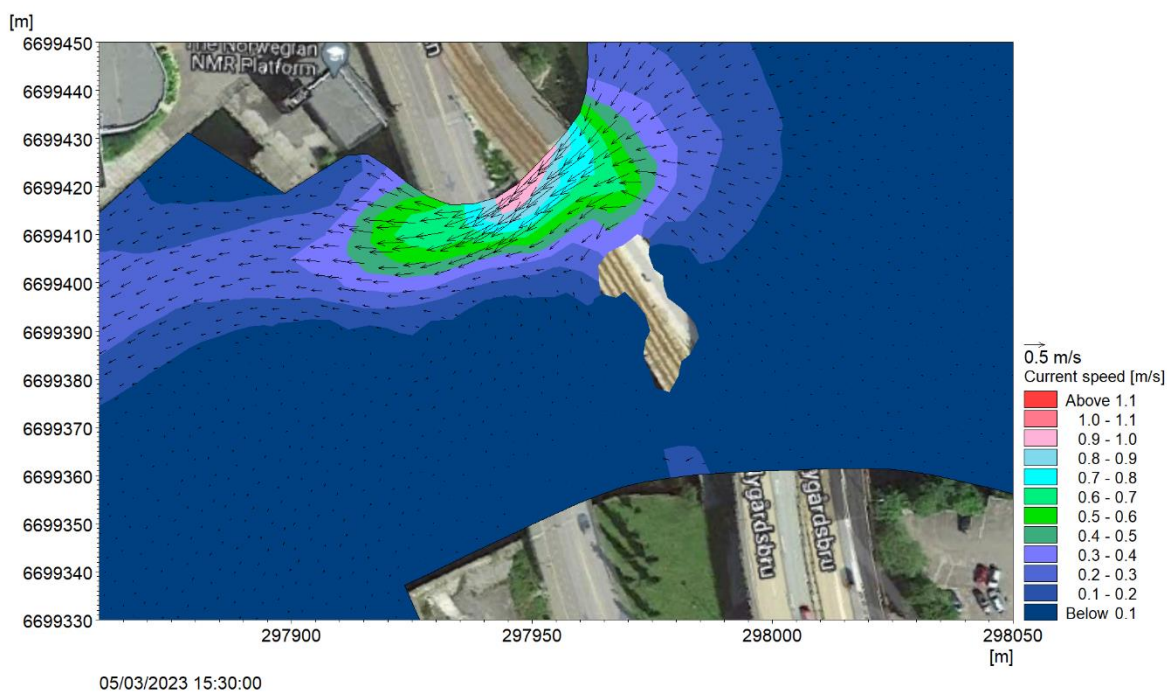


Figur 8 Modellert og observert vannstand i Store Lungegårdsvannet

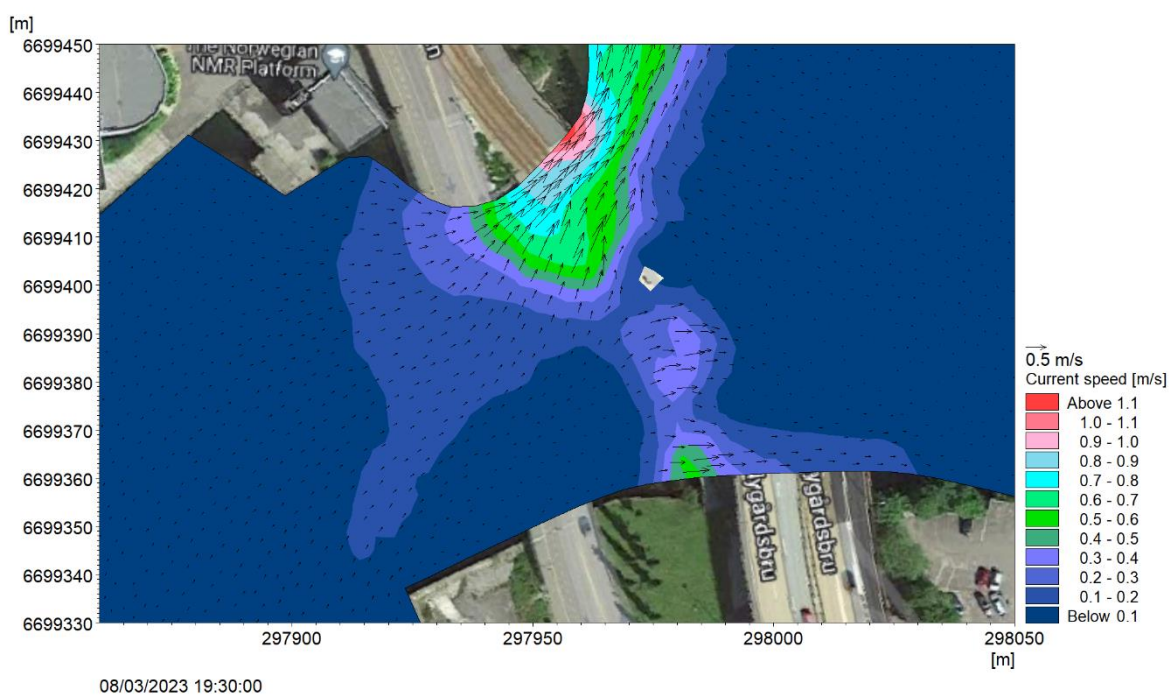


Figur 9 Modellert vannstand i Byfjorden (Outside) og Store Lungegårdsvannet (Inside)

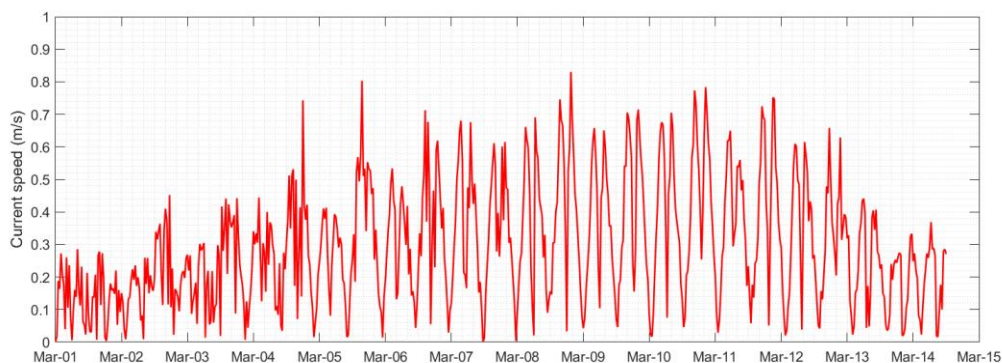
Figur 10 og Figur 11 viser maksimum strømming inn og ut av Store Lungegårdsvannet rundt Nygårdsbruen. Det finnes betydelig strømming her, og det går opp til flere dm/s. Figur 12 viser en tidsserie av strømhastighet i den simulerte perioden her. Strømhastighet er dominert av fylling og tømning av tidevannet.



Figur 10 Modellert strømhastighet rundt Nygårdsbruen (maksimum fjærestrømning)



Figur 11 Modellert strømhastighet rundt Nygårdsbruen (maksimum flostrømning)



Figur 12 Modellert strømhastighet rundt Nygårdsbruen (maksimum fjærestrømning)

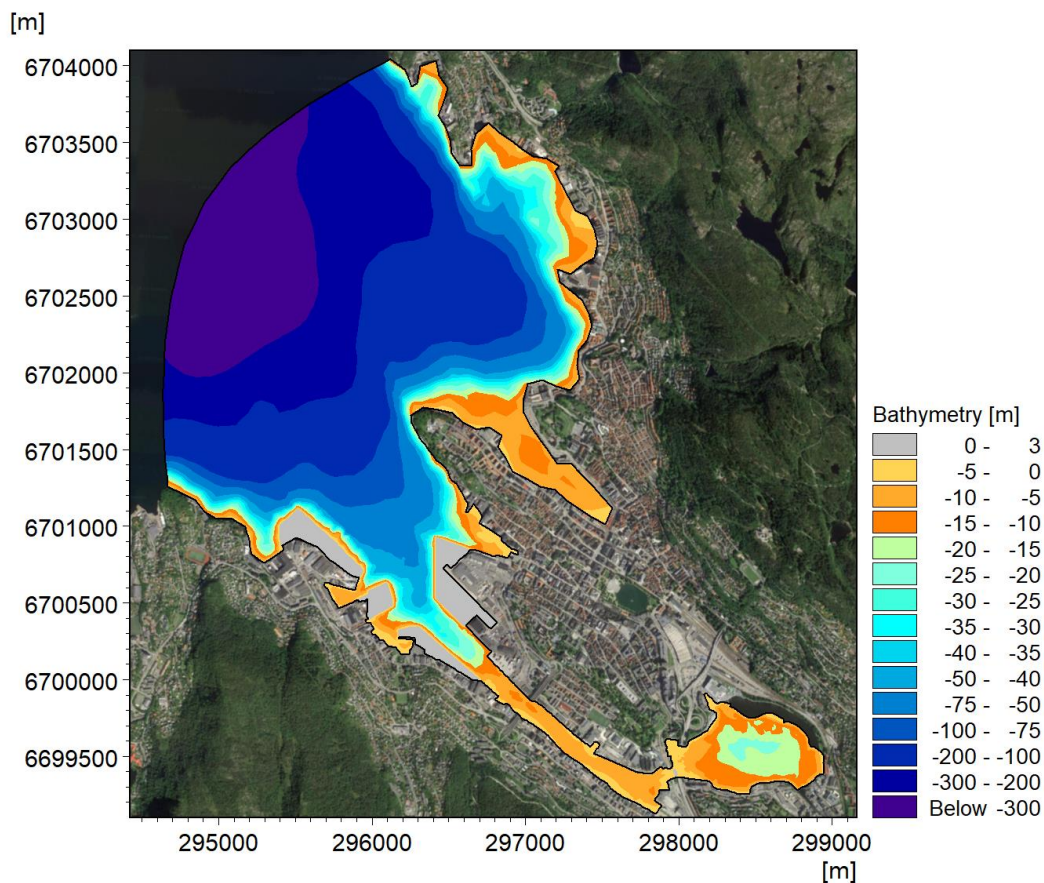
Konklusjonen er at modellen kan reprodusere vannutskiftning in og ut av Store Lungegårdsvann i stor grad og at modellen kan brukes videre til å simulere effekten av utfyllingene. 2D tilnærmingen er tilstrekkelig til å kunne reprodusere daglige vannstandsvariasjoner og vannutskiftning i Store Lungegårdsvann.

4 Resultater vannutskiftning

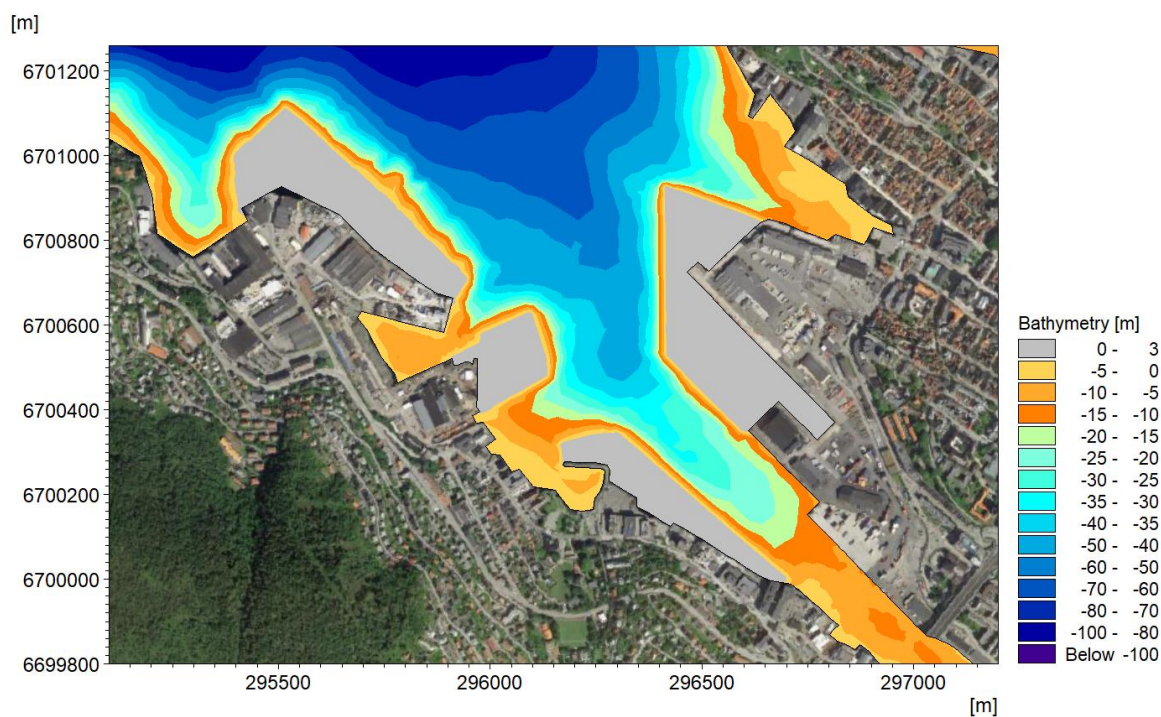
4.1 Fremtidig situasjon

Modellen kan nå kjøres med utfyllingsalternativet. For å kunne utføre dette, må bunnen i modellen være tilpasset en fremtidig situasjon med alle fire utfyllingene på plass. Konturene av utfyllingene ble tilsendt av Bergen Kommune. Tilsendt informasjon om Dokken utfyllingen var detaljert nok til å kunne lage en detaljert utfylling under vann. For de andre tre alternativene har vi bare fått tilsendt en kontur over vann. Her har vi antatt en undervannshelning på 1:2 for utfyllingsfoten ned til eksisterende sjøbunn. Resultatet vises i Figur 13 og Figur 14.

Utfyllingsscenario ble kjørt for den samme perioden som kalibreringsperioden (1-15 mars 2023).



Figur 13 Dybde i modellen, utfyllingsalternativet. Dagens situasjon er gitt i Figur 7.

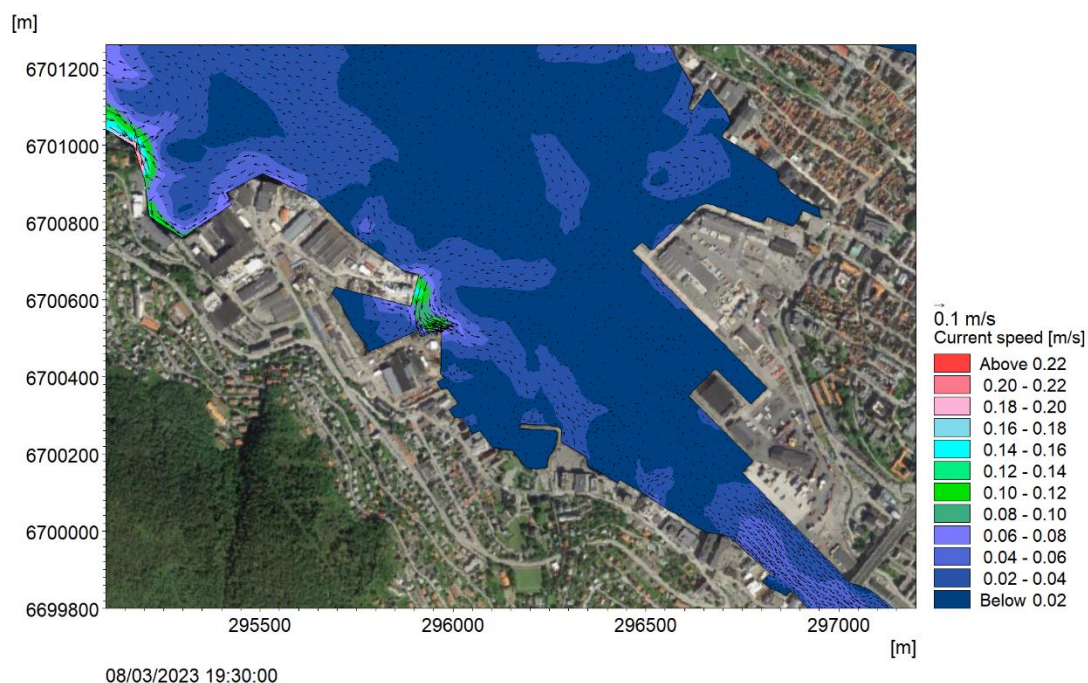


Figur 14 Detalj av dybden i modellen, utfyllingsalternativet. Dagens situasjon er gitt i Figur 7.

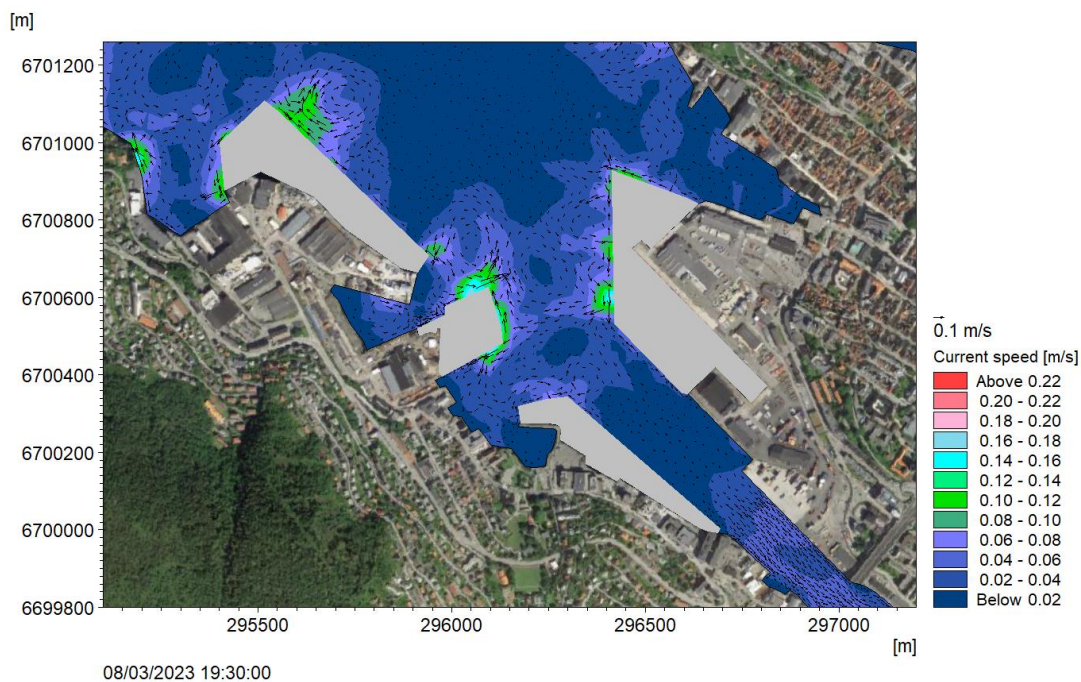
4.2 Strømbilder

Figur 15 og Figur 16 viser et strømbilde for dagens situasjon og fremtidig utfyllingsscenario. Det er flere virvler i Puddefjorden ifølge modellen, og plasseringen av disse virvlene blir påvirket av utfyllingene. I utfyllingsscenarioene blir strømmen rundt disse utfyllingene naturligvis litt høyere (10-12 cm/s). Samtidig øker strømhastighet mellom utfyllingene på nord og sørsiden av Puddefjorden litt (noen cm/s). Strømhastighetsendringene er såpass små at disse har ingen forventning effekt på f.eks. navigasjon.

Disse simuleringene er utført uten påvirkning fra vind på strømningsforholdene, og dermed kan strømbildet avvike noe. Strømbildet er to-dimensjonalt, og påvirkning av stratifisering er ikke med.



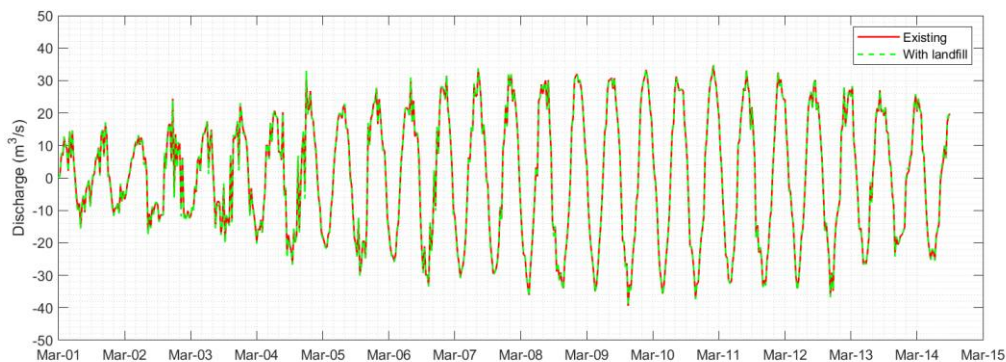
Figur 15 Strømbilde Dagens Situasjon: 08/03/2023 19:30, Flo.



Figur 16 Strømbilde Fremtidig Situasjon: 08/03/2023 19:30, Flo.

4.3 Vannutskiftning Store Lungegårdsvann

Figur 17 viser vannføring inn og ut av Store Lungegårdsvann mellom dagens situasjon og med utfyllingsalternativet. Man kan se liten forskjell mellom de to scenariene.



Figur 17 Vannføring inn og ut av Store Lungegårdsvann for dagens situasjon (Existing) og med utfyllingsalternativet (With landfill).

En beregning av totalt volum vann som renner (i gjennomsnitt) inn og ut av Store Lungegårdsvann per tidevann (Tabell 4-1) viser at det er 0.3 % og 0.2 % forskjell i vannvolum. Dette anser vi som ubetydelig. Modellen viser til og med at det er en liten amplifikasjon av tidevannet og at vannutskiftningen blir litt større.

Tabell 4-1 Volum vann per tidevann som renner inn (flo) og ut (fjære) av Store Lungegårdsvannet.

Volum	Dagens situasjon	Fremtidig situasjon	Forskjell
Volum flo per tidevann	440200 m ³	441600	0,3 %
Volum fjære per tidevann	429860 m ³	430700	0,2 %

4.4 Vannutskiftning buktene

På grunn av utfyllingene er det flere bukter som blir mer avskjermet fra sjøen (Kirkebukten, Søreivågen, Nordevågen, Nøstebukten, se Figur 1), og derfor er det potensielt mer fare for stillestående vann og dårlig vannkvalitet. Basert på strømbildene (Figur 15 og Figur 16) ser vi at det ifølge modellen oppstår virvler og sirkulasjonsstrømninger i disse buktene. Disse virvlene bidrar til at det ikke er forventet at vannet blir stillestående som kan gi dårlig vannkvalitet. Fremtidig situasjon (Figur 16) viser omtrent samme sirkulasjonsstrømning som i dag (Figur 15).

Forskjellen i vannvolum per tidevann er gitt i Tabell 4-2 for de forskjellige buktene (se Figur 1). Forskjellene er relativt små, men det finnes en liten økning i vannvolum. Kirkebukten og Søreivågen har de største økningene på 0,17 og 0,18 %, mens Nordevågen og Nøstebukten som ligger lengre vekk fra influensområde, har en økning på 0,02 og 0,08%.

Tabell 4-2 Forskjell i vannvolum som renner inn (flo) og ut (fjære) av de buktene.

Volum	Forskjell
Kirkebukten	0,17 %
Søreivågen	0,18 %
Nordevågen	0,02 %
Nøstebukten	0,08 %

4.5 Diskusjon effekt stratifisering

Det er observert at daglig vannutskiftning i Store Lungegårdsvann blir dominert av tidevannet. Siden vannet er stratifisert, er det særlig topplaget i Store Lungegårdsvann som har daglig relativ mye vannutskiftning. Det dypere vannet i Store Lungegårdsvann er mer saltholdig og dermed tyngre. Normalt skifter dette vannet ikke ut med det daglige tidevannet. Det har derfor mye lengre oppholdstid i Store Lungegårdsvann enn topplaget.

Siden vannutskiftning under daglige forhold ikke blir forverret i en framtidig situasjon der utfyllingene er inkludert, forventer vi heller ikke at oppholdstiden til bunnvannet i Store Lungegårdsvann blir forlenget.

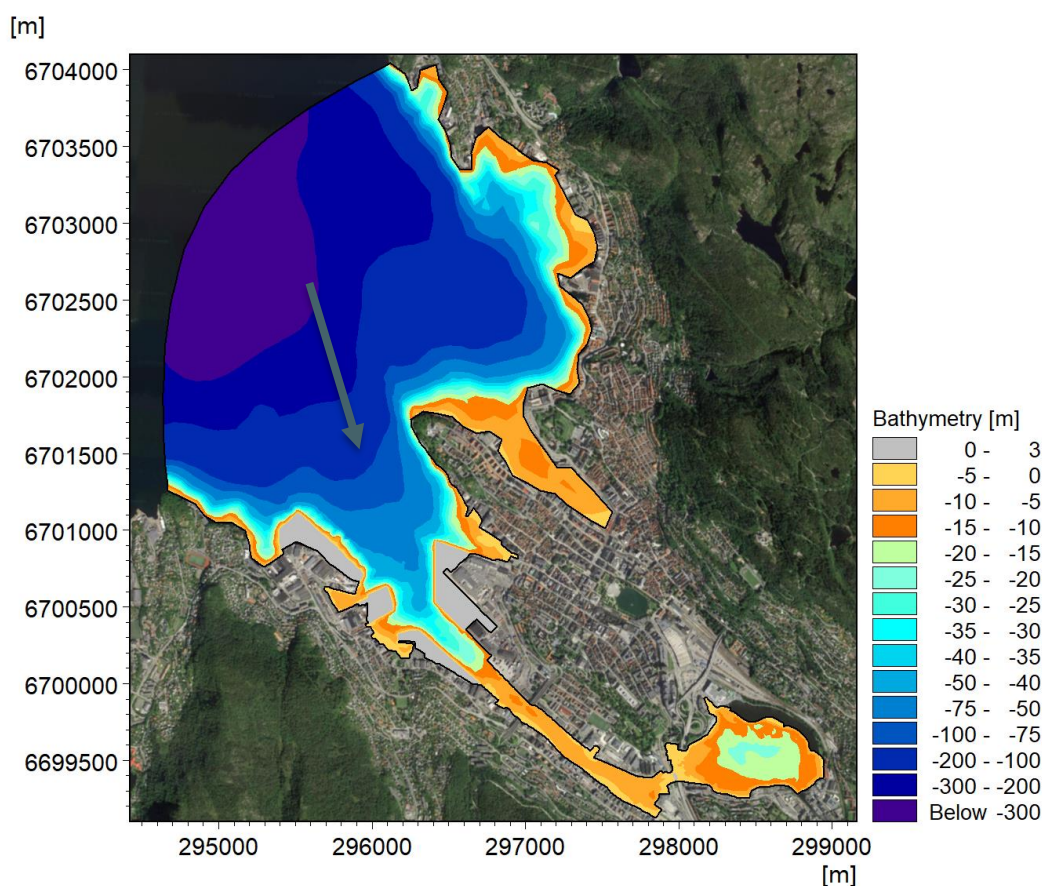
5 Bølger

I dette kapittelet gir vi en overordnet vurdering av effekten av utfyllingene på bølgeforhold i Puddefjorden. Bølger er viktig for nautiske aspekter, prosjektering av erosjonssikring av utfyllingene og evt. flomrisiko.

Generelt sett kommer de største bølgene fra nordvest når vinden blåser sterk fra denne retningen. Her er det en strøklengde på 14 km over åpent hav, og bølger kan vokse over denne avstanden.

Utfyllingene skaper generelt mer skyggevirking for bølger, og derfor kan man anta at bølgeforholdene blir bedre. Her antar man at bølger ikke reflekterer mot utfyllingene. Her er det av betydning om det er planlagt vertikale kaier/murer mot sjøen som reflekterer bølger maksimalt, eller om det er planlagt slake skrånninger hvor bølger kan bryte og dermed ikke reflekterer.

Det er opp til hvert utfyllingsprosjekt å se nærmere på bølger. Her anbefales det å bruke bølgemodellering for å optimalisere bølgeforhold.



Figur 18 Dybde utfyllingsalternativet og retning av dominerende bølger (nordvest) for området. Dagens situasjon er gitt i Figur 7.

6 Konklusjon

En hydrodynamisk modell som ble kalibrert ved hjelp av vannstandsmålinger i Byfjorden og Store Lungegårdsvann ble kjørt med dagens situasjon og en framtidig situasjon med de fire utfyllingene på plass (Dokken, Laksevågneset, Laksevåg Verft og Damgård sveien). Forskjellen mellom de to scenariene i vannutskiftning var marginal og dermed ubetydlig. Det konkluderes derfor med at vannutskiftningen i Store Lungegårdsvann, Damgårdssundet, Puddefjorden og de forskjellige buktene ikke blir påvirket i negativ retning av de planlagte utfyllingsprosjektene.

Generelt sett vurderes bølgeforholdene i Puddefjorden til å bli bedre enn i dagens situasjon på grunn av skyggevirking av utfyllingene. Det er en premisse at bølger ikke reflekterer (mye) mot utfyllingene. Særlig vertikale kaier/murer kan reflektere bølger. Det anbefales å se nærmere på bølgeforhold i alle planene når mer detaljer er kjent.

7 Referanser

DHI, 2020: MIKE User Manual, Software Package 2020.

Nearshore Survey, 2022: Multistråle ekkolodddata Store Lungegårdsvann og Puddefjorden