

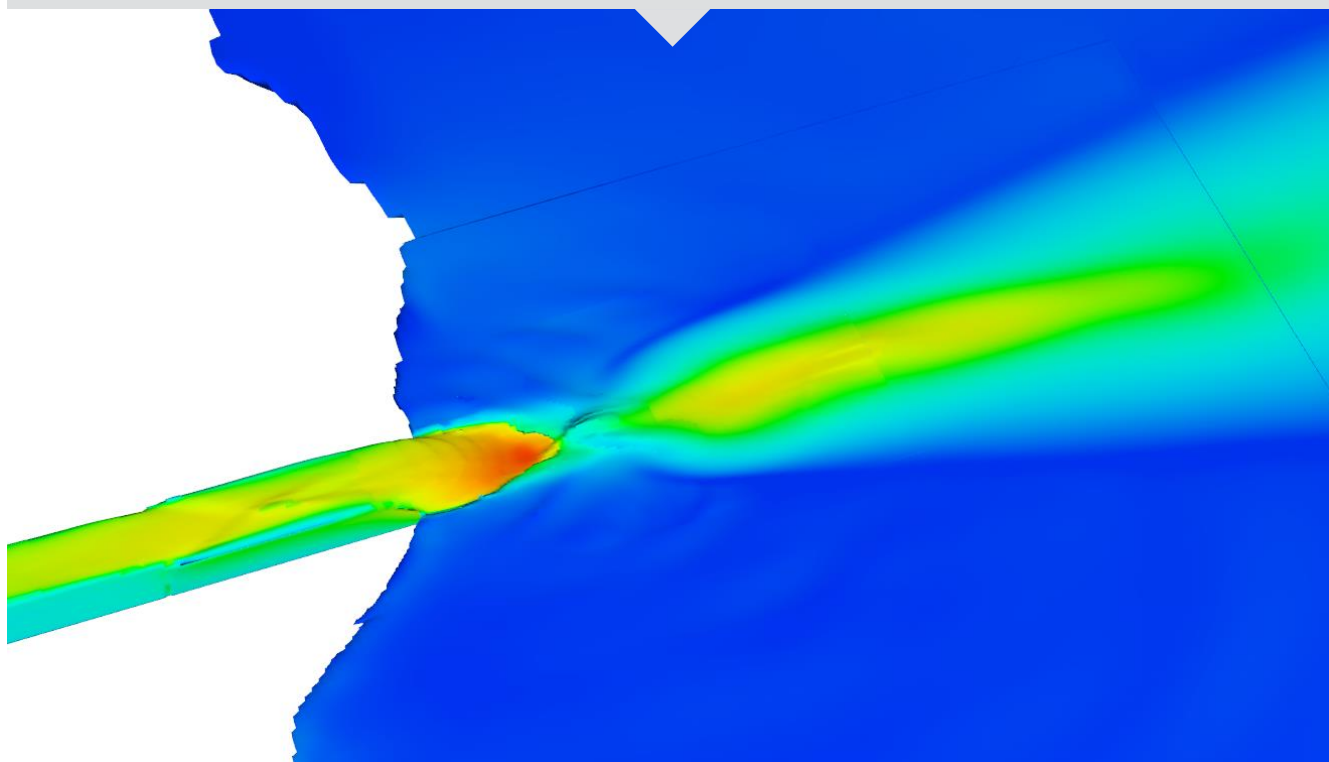
Vedlegg 4 Strømning ved utløpet i Sørfjorden ved ordinær drift og under flom (Norconsult 2018)

SKL AS

Opo og Sandvinvatnet. Flomsikring og kraftproduksjon

KU fase, teknisk rådgivning
Alternativ vest

Strømning ved utløpet i Sørfjorden ved ordinær drift og under flom



Oppdragsnr.: 5171399 Dokumentnr.: D08 Versjon: D05
2018-03-22

Oppdragsgiver: SKL AS
Oppdragsgivers kontaktperson: Sture Karlsen / Inger Johanne Hagen
Rådgiver: Norconsult AS, Vestfjordgaten 4, NO-1338 Sandvika
Oppdragsleder: Gunnar Solvang
Fagansvarlig: Lars Jenssen
Andre nøkkelpersoner: Olav Anders Jørstad

D05	2018-03-22	Generert innholdsfortegnelse	Lars Jenssen	Gunnar Solvang	Gunnar Solvang
D04	2018-03-08	Oppdatert avsnitt 2.3.3, figur 49, avsnitt 3.6 og vedlegg 1 - 3.	Lars Jenssen	Gunnar Solvang	Gunnar Solvang
D03	2017-06-21	Punktnummer i kap. 3.5	Lars Jenssen	Gunnar Solvang	Gunnar Solvang
D02	2017-06-20	Tilføyd kap. 3.5	Lars Jenssen	Gunnar Solvang	Gunnar Solvang
D01	2017-06-02	Til oppdragsgiver for gjennomgang	Lars Jenssen	Olav Anders Jørstad	Gunnar Solvang
Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent

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

Sammendrag

SKL planlegger å bygge et kombinert kraftverk og flomløp som tar inn vann i Sandvinvatnet og slipper vannet ut i Sørfjorden ved Odda.

Det utredes to mulige alternativer; alternativ vest og alternativ øst. Denne rapporten omhandler kun alternativ vest.

SWECO skal utrede konsekvensene av utbyggingen. Som grunnlag for å vurdere konsekvensene av vannutslippet i Sørfjorden har vi beregnet hvordan strømmingen fra tunnelutløpet vil spre seg i fjorden.

Vi har beregnet strømmens hastighet og retning fra tunnelutløpet og ca. 300 m utover, i tre dimensjoner (x, y, z).

I beregningene er det tatt hensyn til tetthetsforskjellen mellom saltvannet i fjorden og ferskvannet fra tunnelen.

Beregningene er gjort for tre vannføringer:

- Maksimal flomvannføring, 500 m³/s
- Maksimal driftsvannføring i kraftverket, 75 m³/s
- Halv driftsvannføring i kraftverket, 37,5 m³/s

Beregningene er gjort med programmet Flow-3D.

Innhold

1	Bakgrunn og hensikt	5
2	Oppsett av beregningsmodellen	6
2.1	Beregningene ble gjort med Flow 3D	6
2.2	Geometri	6
2.2.1	Utforming av tunnelsystemet	6
2.2.2	Bunntopografien i Sørfjorden	8
2.2.3	Terrenget rundt Sørfjorden	9
2.3	Vannføring, vannstand og saltinnhold	9
2.3.1	Vannføring	9
2.3.2	Vannstand	9
2.3.3	Saltinnhold og tyngdetetthet	12
2.4	Gitter og grensebetingelser	13
2.4.1	Koordinatsystemet i beregningsmodellen	13
2.4.2	Oppbygging av beregningsgitteret	14
2.4.3	Grensebetingelsene	15
2.4.4	Startbetingelsene	17
2.5	Friksjons- og singulærtap	17
2.6	Numerisk beregningsmetode	17
2.7	Beregningsfilosofi og praktisk gjennomføring av beregningene	17
3	Resultatene	19
3.1	Generelt om presentasjon av resultatene	19
3.2	Maksimal flomvannføring, $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$	19
3.3	Vanlig driftsvannføring, $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$	26
3.4	Halv driftsvannføring, $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$	32
3.5	Tilleggsresultat, hastighet ved to valgte punkt	37
3.6	Tilleggsresultat, hastigheten nær bunnen	42
4	Vurdering av resultatene	43
4.1	Strålens utbredelse	43
4.2	Saltvannets betydning	43
4.3	Bunntopografien ved utløpet	45
4.4	Bølger ved utløpet	45
5	Vedlegg	48

1 Bakgrunn og hensikt

SKL planlegger å bygge et kombinert kraftverk og flomløp som tar inn vann i Sandvinvatnet og slipper vannet ut i Sørfjorden ved Odda.

Det utredes to mulige alternativer; alternativ vest og alternativ øst. Denne rapporten omhandler kun alternativ vest.

SWECO ved Halvard Kaasa skal vurdere konsekvensene (KU), og har i den forbindelse bedt om opplysninger om strømforholdene i Sørfjorden, som beskrevet under.

Vi regner også med at beregningsmodellen vil være nyttig i forbindelse med detaljprosjektering av utløpet.

Dette notatet beskriver strømforholdene ved utløpet i Sørfjorden ved normal kraftverksdrift og med full flomvannføring.

SWECO ønsket følgende som grunnlag for konsekvensutredningen (sitat fra epost):

Marint miljø

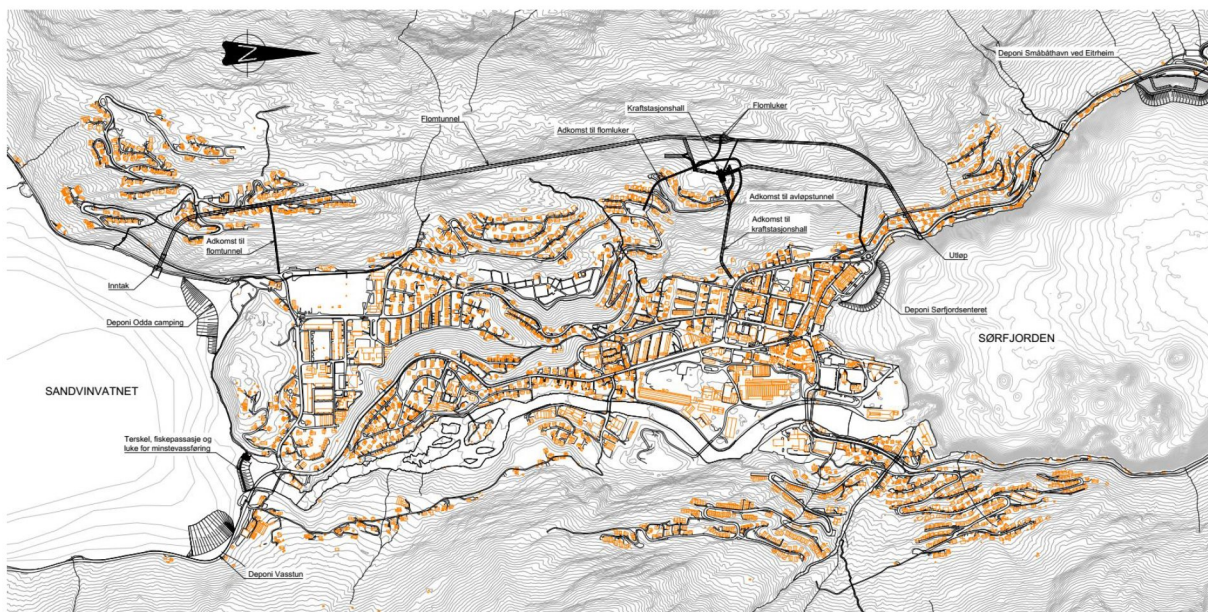
Vannføringseksempel:

- 1) Maks driftsvassføring i kr.stasjonen.
- 2) Ca 50% drift av kr. stasjonen
- 3) Maks vassføring flaumtunnel

Transekt i sjøen frå overflate til botn og med info om hastigheitsvektorer.

Transekt

- a) 10 m utanfor utløpet av tunnel,
- b) 60 m frå tunnell utløp
- c) 300m frå tunnel utløp.



Figur 1 Oversikt over planlagt flomtunnel og kraftverk (utsnitt fra tegning 5163658-B100-D03)

2 Oppsett av beregningsmodellen

2.1 Beregningene ble gjort med Flow 3D

For å beregne strømmingen gjorde vi en 3D CFD (Computational Fluid Dynamics) beregninger med Flow-3D. Flow-3D er et kommersielt CFD program som benytter kontinuitet og Navier-Stokes kraftlikevektsligninger for å beregne strømning dynamisk i tre dimensjoner.

Mer informasjon om Flow-3D finnes her: www.flow3d.com

2.2 Geometri

For beregningene må vi definere formen (geometrien) til havbunnen og tunnelen. Det er beskrevet under.

2.2.1 Utforming av tunnelsystemet

Figur 2 til Figur 4 viser tunnelsystemet og utløpet.

Vannet strømmer ned en skråttunnel (overkritisk strømning) og møter et energidreperbasseng der bunnen er senket. Strømningen fra energidreperbassenget til fjorden er underkritisk. Ved utløpet i fjorden er tunnelen 10 m bred og 12 m høy. Bunnen i tunnelen nedstrøms energidreperbassenget ligger på kote - 5 moh.

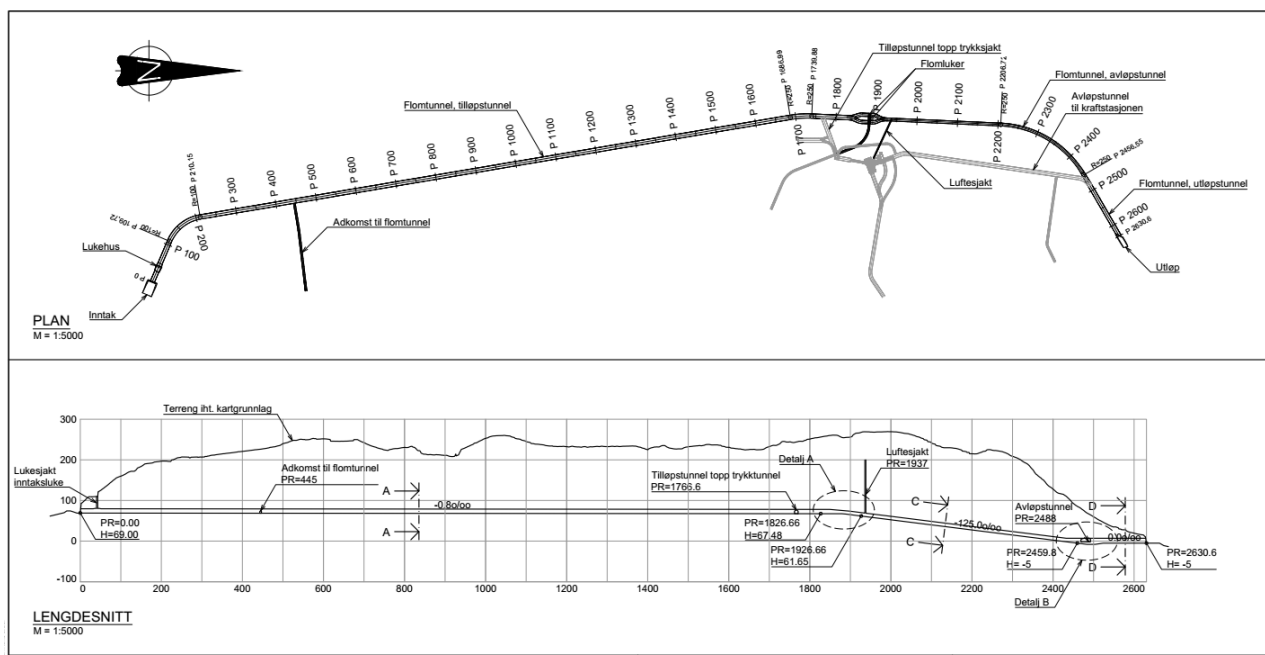
Ved utløpet av tunnelen er en forskjæring. Bunnen av forskjæringen er 10 m bred og er på - 5 moh. Sidehellingen er 10:1 (V:H).

I beregningene har vi tatt med ca. 100 m av tunnelen oppstrøms utløpet i fjorden. Det er tatt med så stor lengde, ca. 10 ganger hydraulisk diameter, for å sikre at strømmingen ved utløpet ikke påvirkes av grensebetingelsene ved innløpet til modellen.

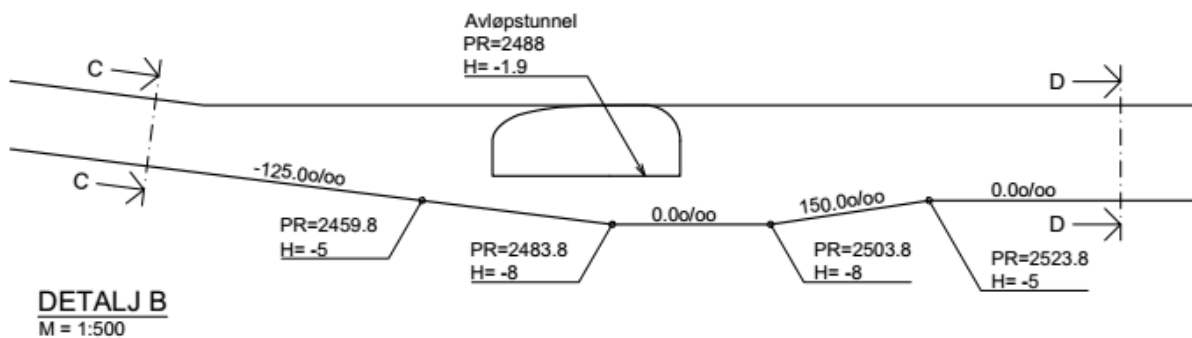
I tillegg har vi en tilstrømningsdel der vannet ledes til tunnelen gjennom en strømlinjeformet kontraksjon. Her er tak og bunn senket slik at vi får et dykket innløp med klart definert tilstrømningsareal og lav vannhastighet. Dette gir en god oppstrøms grensebetingelse for beregningene.

Vi modellerer ikke skråttunnelen eller vannstandsspranget i energidreperbassenget, da det har liten betydning for strømmingen i utløpet.

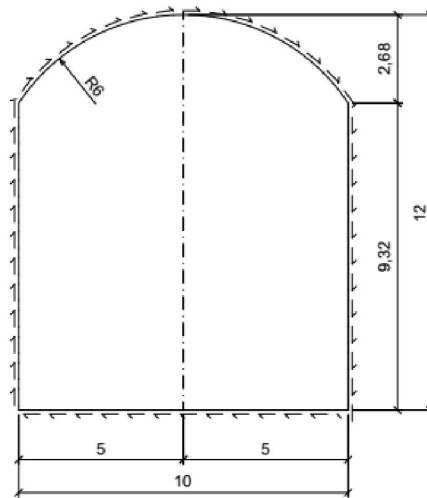
Figur 5 viser et snitt av utløpet med den geometrien som vi brukte i beregningene.



Figur 2 Flomtunnelen, plan og lengdeprofil (utsnitt fra tegning 5163658-B103-D02)

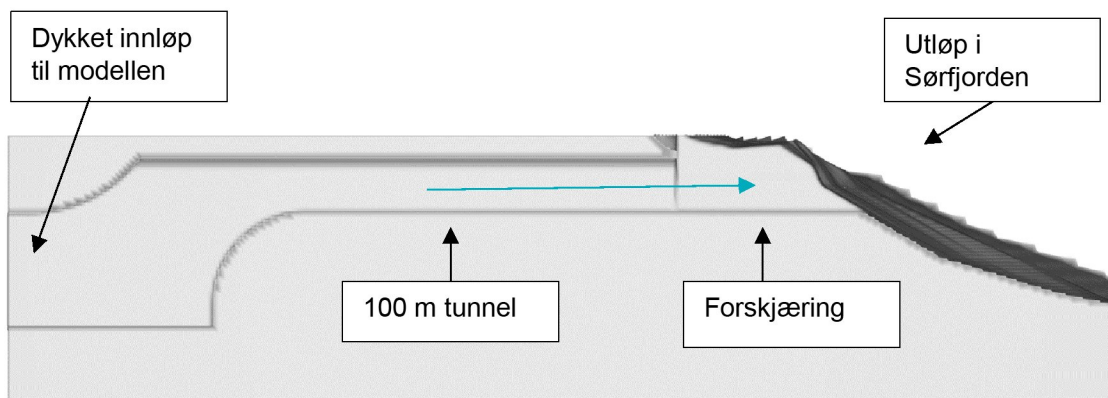


Figur 3 Flomtunnelen, lengdeprofil, detalj av energidreperbassenget (utsnitt fra tegning 5163658-B103-D02)



SNITT D-D (A=55 m²)
 M = 1:100

Figur 4 Flomtunnelen, tverrsnitt nær utløpet (utsnitt fra tegning 5163658-B103-D02). Arealet på 55 m² er feil.



Figur 5 Utløpet av flomtunnelen, lengdesnitt av geometrien som ble brukt i beregningene, lengdeprofil.

2.2.2 Bunntopografien i Sørfjorden

Bunntopografien for indre del av Sørfjorden er hentet fra sjøbunnskart. Kartet har 1 m ekvidistanse.

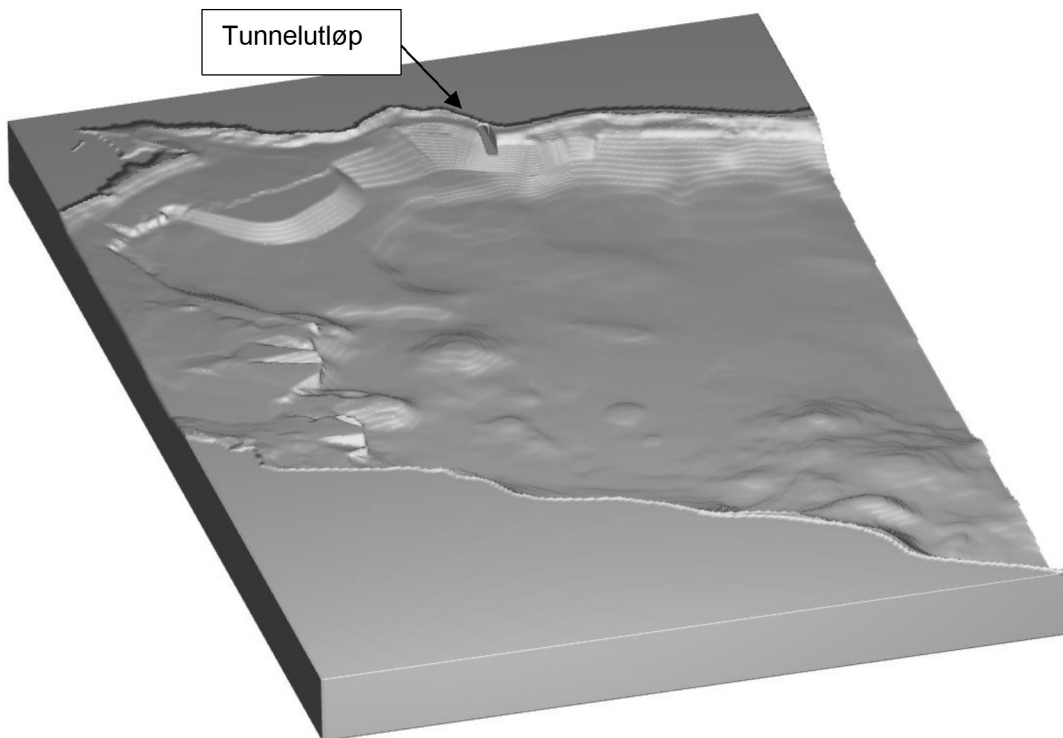
Nær land var det ikke samsvar mellom bunntopografien og laserskanning av terrenget over vann. Vi antok at laserskanningen var riktig, og at feilen skyldes at sjøbunnen ikke var målt nær land.

For området ca. 100 m til hver side av tunnelutløpet brukte vi derfor ikke bunntopografien fra sjøbunnskartet for høydeintervallet 0 til – 15 moh. Her genererte vi isteden nye høyder ved å interpolere mellom kote – 15 moh. fra sjøbunnskartet og kote + 1 moh. fra topografisk kart.

2.2.3 Terrenget rundt Sørfjorden

Rundt fjorden tok vi med terreng opp til kote + 10 moh. Terrenget er ikke viktig for beregningene, men for å visualisere området. Terrenget ble tatt fra topografisk kart med 1 m ekvidistanse.

Figur 6 viser terrengmodellen vi brukte.



Figur 6 Terrengmodellen som ble brukt i beregningene

2.3 Vannføring, vannstand og saltinnhold

2.3.1 Vannføring

Kraftverket er planlagt med en maksimal driftsvannføring på 75 m³/s. 50 % driftsvannføring blir da 37,5 m³/s.

Flomtunnelen er planlagt med maksimal kapasitet på 500 m³/s.

2.3.2 Vannstand

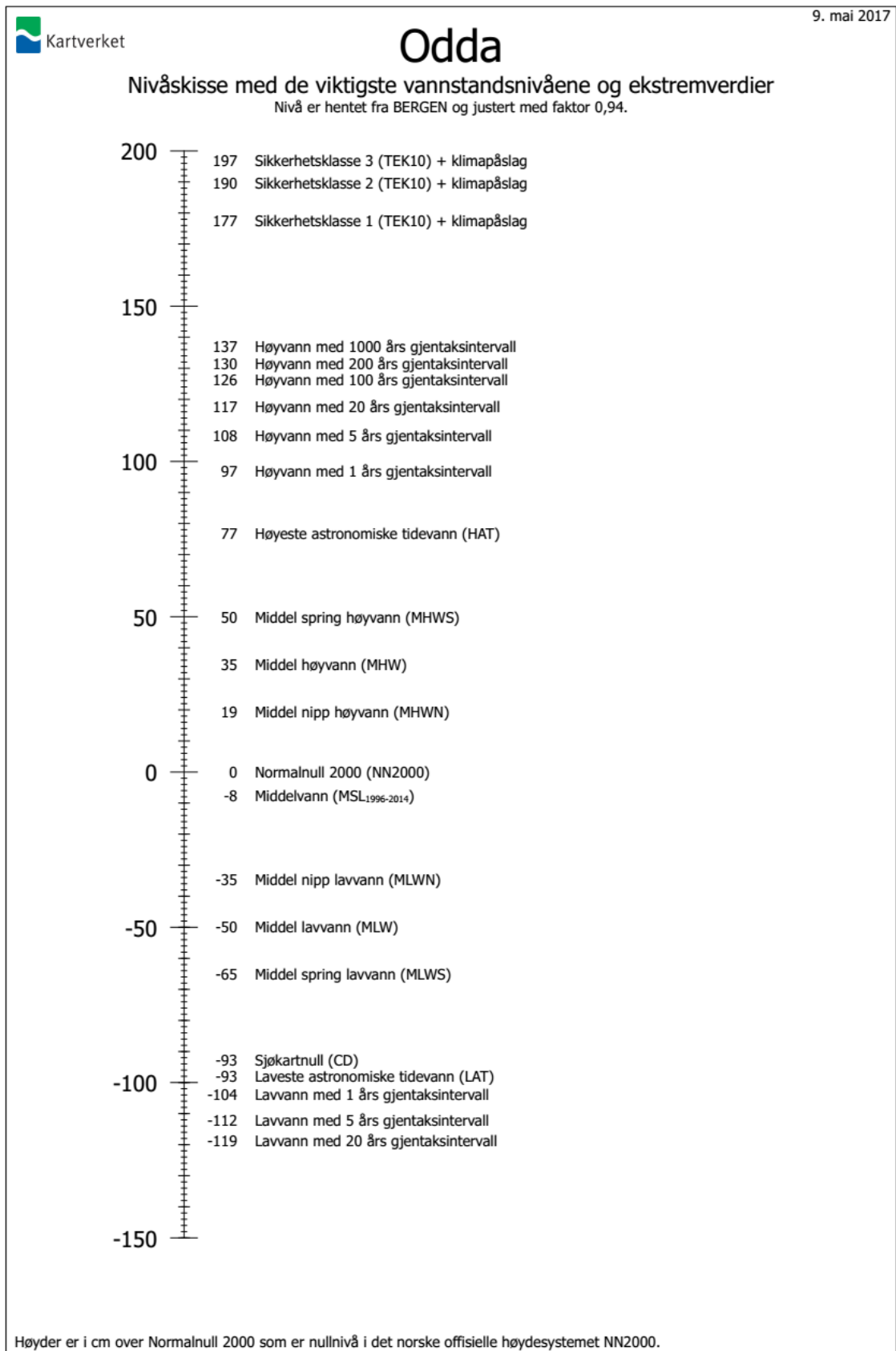
Vannstanden i fjorden varierer med flo og fjære. Figur 7, som er hentet fra Kartverkets tjeneste *Se Havnivå*, viser karakteristiske vannstander.

Vi har antatt at lav vannstand er mest kritisk fordi det gir størst vannhastighet ved tunnelutløpet og fordi strålen fra utløpet blir rettet litt nedover. Vannhastighetene ved bunnen blir derfor større enn når det er høyvann.

For strømningsberegningene har vi derfor forutsatt at det er lavvann med 1 års gjentaksintervall. At flomtunnelen brukes samtidig med så lav vannstand har relativt lav sannsynlighet, men kan forekomme.

I beregningene har vi brukt fast vannstand i Sørfjorden = lavvann med ett års gjentaksintervall = -1,04 moh.

Høydereferansen er NN 2000.



Figur 7 Vannstander i Sørfjorden ved Odda

2.3.3 Saltinnhold og tyngdetetthet

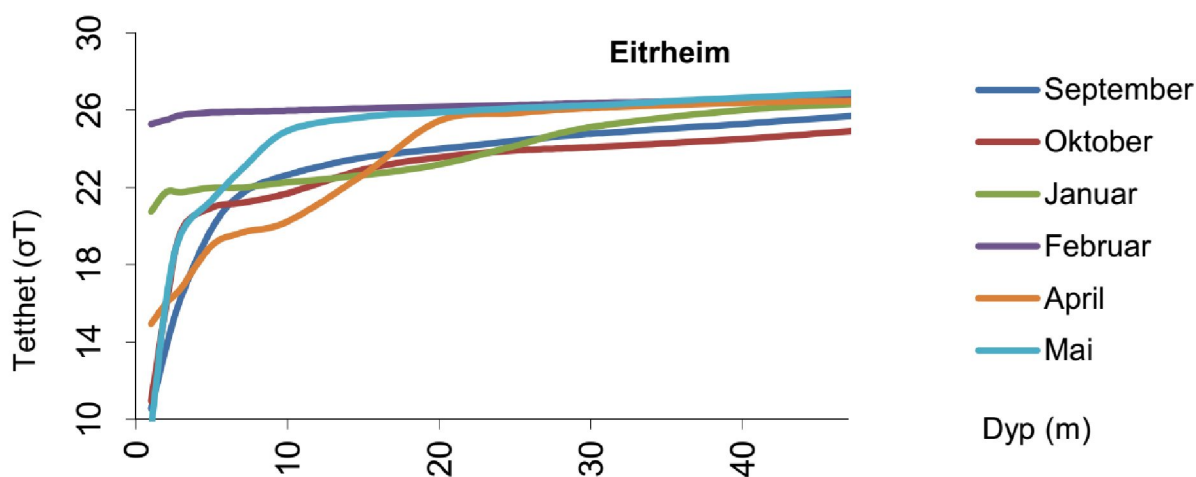
Vannet som strømmer ut fra tunnelen er ferskvann med tyngdetetthet ca. 1000 kg/m^3 . Tettheten vil variere litt med vanntemperaturen, men mellom 0°C og 10°C er endringen mindre enn $0,3 \text{ kg/m}^3$. I beregningene har vi derfor forutsatt at vannet som kommer ut av tunnelen har tyngdetetthet 1000 kg/m^3 .

På grunn av saltinnholdet vil tyngdetettheten til vannet i fjorden varierer mye mer. Figur 8 viser hvordan tettheten varierer over dybden ved Eitrheim (fra *Strømmålinger i Sørfjorden i Hardanger*, Uni Research Miljø / SAM-Marin, 2015). Øverst er et lag med mye ferskvann som har tyngdetetthet ca. 1010 kg/m^3 . I dypet øker tettheten til 1026 kg/m^3 .

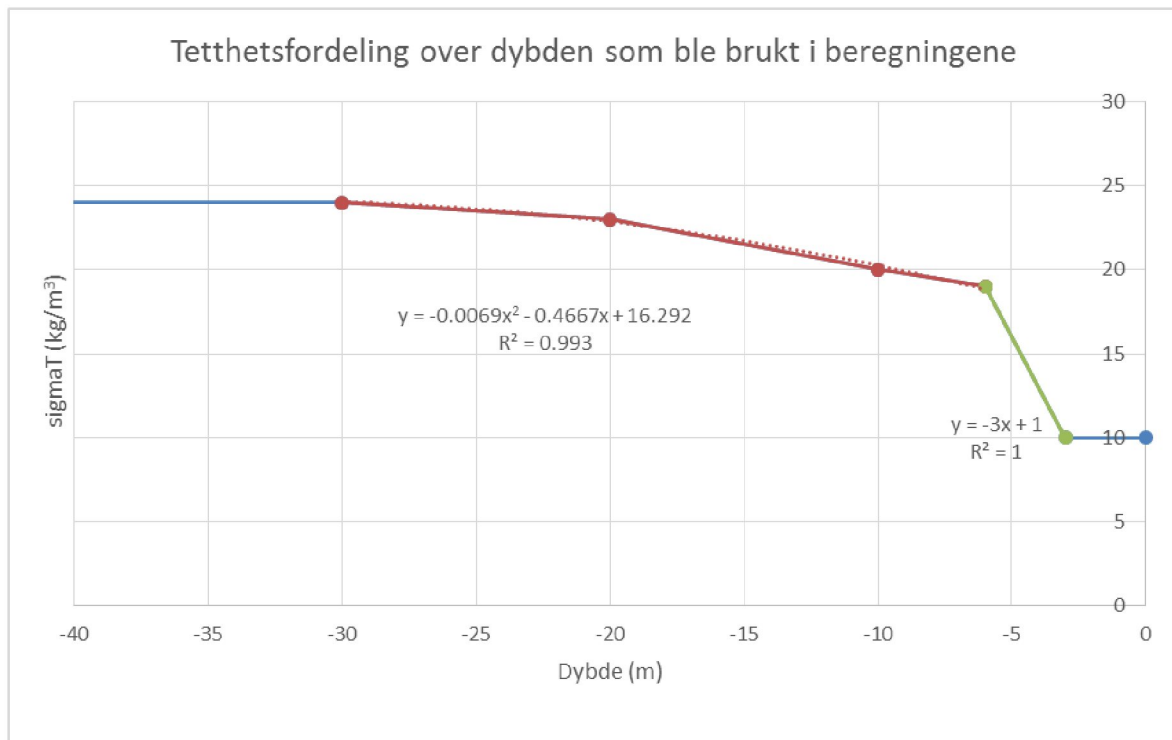
I beregningene har vi forutsatt lagdeling med mye ferskvann, slik at overflatevannet har lav tetthet. Lav tetthet betyr at strømmen fra tunnelen får mindre oppdrift og at den derved kan trenge dypere ned mot bunnen. Lagdelingen vi har brukt i modellen er vist i Figur 9. Fra overflaten til 3 m dybde er tettheten 1010 kg/m^3 , under 30 m dyp er tettheten 1024 kg/m^3 . For dybde 3 til 6 m og for dybde 6 til 30 m er tettheten definert av de to funksjonene som er vist på figuren.

Vi har også sett på andre tetthetsprofiler, f.eks. fra *Statlig program for forurensningsovervåking, Overvåking av miljøforholdene i Sørfjorden* (NIVA rapport 951/2006). Overvåkingen, som foregikk i 2005, viste at tettheten på 10 m dyp varierte fra 1019 kg/m^3 til 1026 kg/m^3 , med middelværdi på 1023 kg/m^3 . Sammenlikner vi med tetthetsprofilen vi har brukt i beregningene (Figur 9) ser vi at profilen vi har brukt ligger nær minimumsverdiene fra målingene i 2005. Det viser at vårt profil er på den sikre siden fordi lav tetthet, som vi har antatt, gir strømmen fra tunnelen liten oppdrift.

Det er også viktig å merke seg profilen vi har brukt gjelder starttilstanden i beregningsmodellen. Etter hvert som beregningene kjøres tilføres modellen mye ferskvann, særlig for flomvannføring på $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Det fører til at saltinnhold og tettheten til vannet i fjorden gradvis reduseres. Tetthetsprofilen ved begynnelsen av beregningene har derfor ikke så stor betydning for sluttresultatet.



Figur 8 Tetthet målt ved Eitrheim (Horisontal akse = dyp, vertikal akse tetthet minus 1000 kg/m^3)



Figur 9 Tetthetsfordelingen som ble brukt i beregningene

2.4 Gitter og grensebetingelser

For modellen brukte vi et ortogonalt gitter (x, y, z). Lengderetningen til gitteret (x) er parallell med tunnelens lengdeakse, se Figur 12. Oppbygging av gitteret er beskrevet under.

2.4.1 Koordinatsystemet i beregningsmodellen

I beregningsmodellen bruker vi et eget koordinatsystem der x og y angir plasseringen i planet. z gir høyden i moh. med vanlig høydereferanse (NN2000).

Geometrien i modellen er flyttet nær origo, og dreid slik at x-aksen er parallell med tunnelen. Da beregner Flow-3D mer nøyaktig.

I forhold til det ordinære koordinatsystemet er geometrien i modellen faseforskjøvet som følger:

$$dx = -361\,000 \text{ m}$$

$$dy = -6\,660\,000 \text{ m}$$

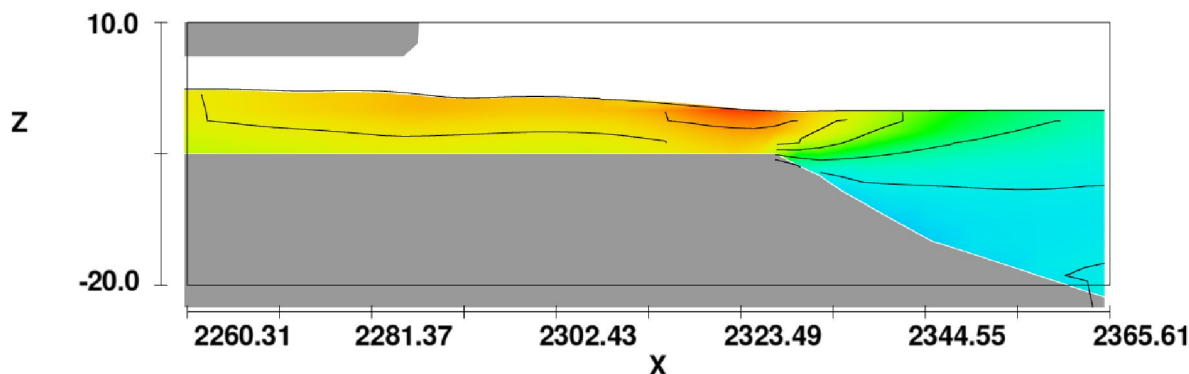
For å legge x-aksen langs lengderetningen til tunnelen ble geometrien rotert $-30,178^\circ$ om punktet 1311,566, 1359,349 (x, y).

Tunnelutløpet

Når vi refererer til tunnelutløpet, f.eks. avstanden fra utløpet, har vi forutsatt at utløpet har koordinatene 2300, 1516, -5. Men x-verdien for tunnelutløpet er ikke entydig gitt fordi terrenget ved

utløpet skråner og fordi det er en forskjæring utenfor tunnelåpningen, se Figur 10. Overgangen mellom tunnel og forskjæring ligger ved $x = 2286,6$.

Når vi oppgir data for et punkt 10 m fra utløpet, dvs. ved $x = 2310$, så ligger det altså i forskjæringen.



Figur 10 Detalj av tunnelutløpet (lengdesnitt). Ved angivelse av avstand til utløpet har vi satt utløpet til $x = 2300$ m

2.4.2 Oppbygging av beregningsgitteret

I programmet Flow-3D deles området som skal beregnes opp i et gitter som består av celler. For hver celle beregner programmet trykk, hastighet etc.

Små celler gir et finmasket gitter. Det gjør beregningene mer nøyaktige og detaljerte. Vi kan ta ut resultat for hver celle. Ulempen med et fint gitter er at beregningene tar mye lengre tid.

Ved å bruke små celler der strømmingen påvirker resultatet i stor grad, f.eks. ved tunnelutløpet, og større celler i mindre viktige områder, f.eks. langt ute i fjorden, kan vi få god nøyaktighet uten at beregningstiden blir for lang.

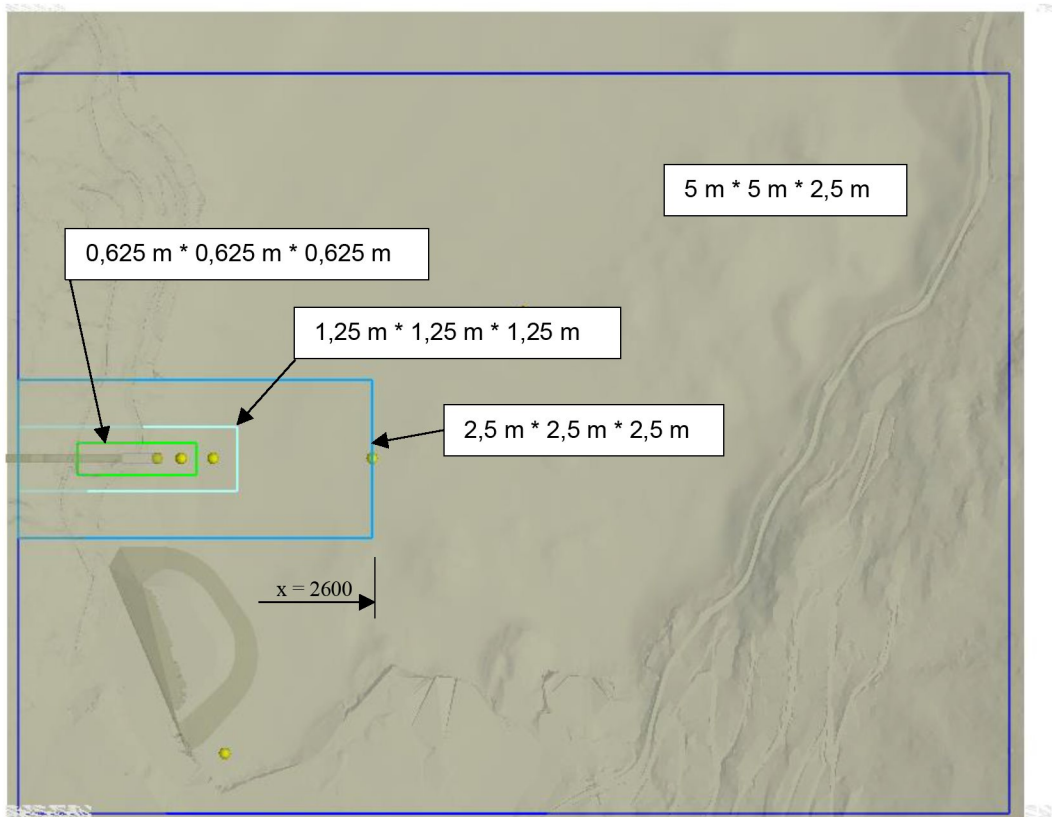
I beregningene har vi brukt 4 gitter som ligger utenpå hverandre (*nested grid*):

1. Et grovt gitter med 5 m store celler som dekker hele området.
2. Et middels gitter med 2,5 m celler.
3. Et fint gitter med 1,25 m celler.
4. Et ekstra fint gitter med 0,625 m celler.

Alle gitrene har kubiske celler, unntatt det grovste. Her er cellene bare 2,5 m dype. Det ble gjort for at den vertikale tetthetsfordelingen ikke skulle bli visket ut.

De fineste gitrene ligger nærmest tunnelen. Gitterstørrelsen avtar utover i fjorden. Figur 11 viser oppbyggingen.

Vi har brukt et fint gitter ved tunnelåpningen fordi her er strømmingstverrsnittet lite. Lengre utover i fjorden vokser strålen i bredden, slik at strømmingstverrsnittet øker. Her bruker vi gitter med større celler.



Figur 11 Oppbygging av gitteret. Grovt gitter dekker hele området (mørk blå ramme). Finere gitter nær tunnelen.

2.4.3 Grensebetingelsene

Grensebetingelsene ble satt på det ytre gitteret. Se også Figur 12.

Oppstrøms grense / grensen mot vest (x_{\min}):

Oppstrøms grense i modellen ble plassert ca. 150 m oppstrøms tunnelutløpet, dvs. inne i fjellet. Grensebetingelsen ble satt til vannføringen i tunnelen ($500 \text{ m}^3/\text{s}$, $75 \text{ m}^3/\text{s}$ eller $37,5 \text{ m}^3/\text{s}$) x-koordinaten til denne grensen varierer noe mellom beregningene, men var i de fleste beregningene $x_{\min} = 2155 \text{ m}$.

Grensen mot øst (x_{\max}):

Denne grensen ble lagt så langt mot øst at den lå på land. Det er ingen vannstrøm gjennom denne grensen. Grensebetingelsen ble satt til symmetrigrense (friksjonsfri vegg).

Koordinaten for denne grensen var $x_{\max} = 3400 \text{ m}$.

Grensen mot nord / fjorden (y_{\max}):

Dette er grensene mot fjorden i nord. Koordinaten for denne grensen var $y_{\max} = 2000 \text{ m}$, som er ca. 500 m nord for tunnelen.

Grensebetingelsen ble satt til trykkgrense (stagnasjonstrykk) med væsknivå på $-1,04 \text{ moh}$.

I tillegg programmerte Flow Science, leverandøren av beregningsprogrammet Flow-3D, en grensebetingelse for tetthetsfordelingen (saltinnholdet) mot grensen. Denne grensebetingelsen skulle holde tetthetsfordelingen ved grensen lik den tetthetsfordelingen vi startet beregningene med.

Grense langs land i sør (y_{\min}):

Denne grensen ble lagt så langt mot sør at den lå på land. Det er ingen vannstrøm gjennom denne grensen. Grensebetingelsen er satt til symmetrigrense.

Koordinaten for denne grensen var $y_{\min} = 1070$ m.

Øvre grense (z_{\max}):

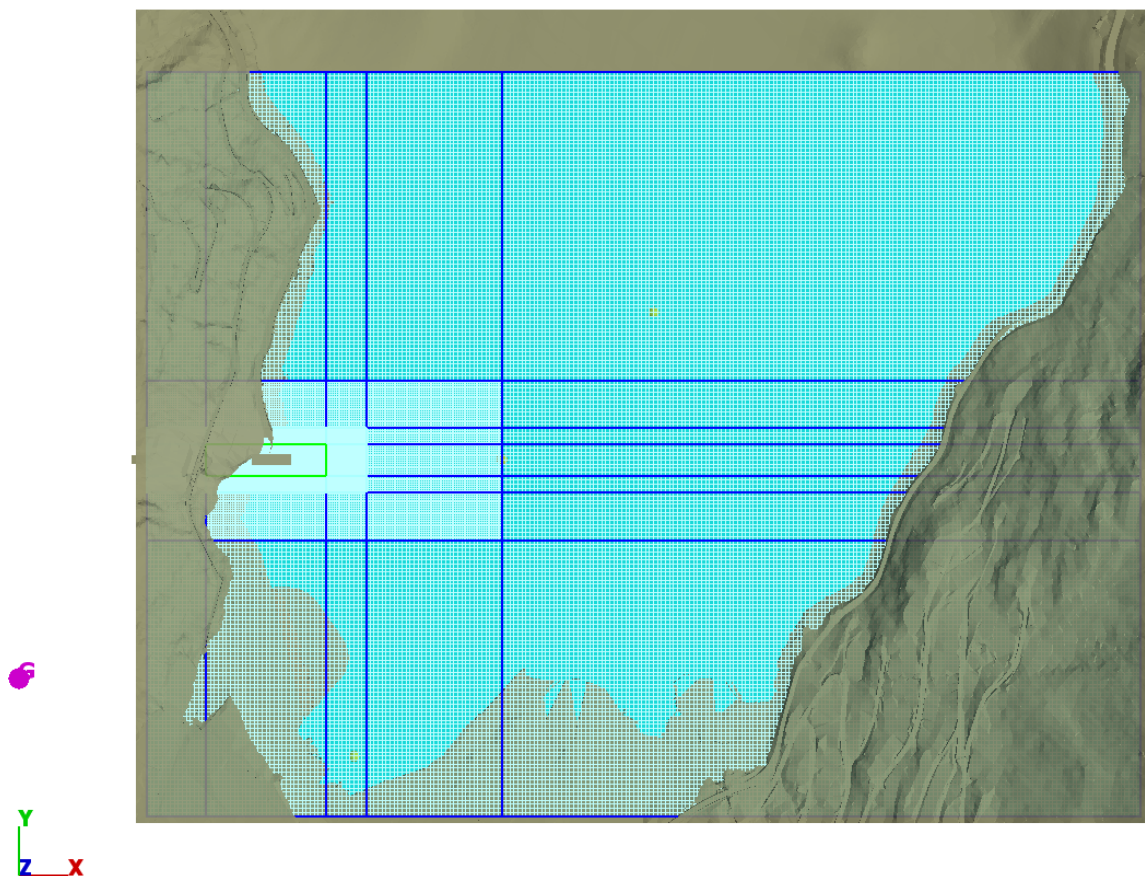
Øvre grense ble plassert på nivå 10 moh. Grensebetingelsen her ble satt til symmetri. Strømningen kommer ikke i kontakt med grensen.

Nedre grense (z_{\min}):

Nedre grense ble plassert på nivå -60 moh. Grensen ligger under havbunnen. Grensebetingelsen her ble satt til symmetrigrense.

Grensene mellom gitrene

Mellom de ulike gitrene blir det automatisk satt en mellomblokkgrense, slik at strømmingen passerer uhindret. Hastighet og trykk interpoleres ved en kombinasjon av Dirichlet og Neumanns grensebetingelser.



Figur 12 Plassering av beregningsgitteret i Sørkjolen. x-aksen mot høyre, y-aksen vertikalt

2.4.4 Startbetingelsene

Ved beregningsstart var modellen fylt med vann opp til -1,04 moh., med tetthetsfordeling som vist på Figur 9.

2.5 Friksjons- og singulærtap

Friksjonen mellom vannet og underlaget beregnes i Flow-3D ut fra ruheten til underlaget. I modellen ble ruheten til tunnelen og havbunnen satt til 40 cm (tilsvarende et Manningstall på ca. $31 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ved bruk av Stricklers formel).

Vannets densitet og dynamiske viskositet settes til henholdsvis 1000 kg/m^3 og $1,5 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$, noe som omtrentlig tilsvarende egenskapene til rent vann ved en temperatur på $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Turbulens i vannstrømmen modelleres ved å benytte RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ligninger med RNG (ReNormalized Group) turbulensmodell med maksimal blandelengde lik 3 m.

RNG-modellen (to-lignings modell) er en statistisk tilnærming til turbulens som benyttes for å beregne turbulens (tilnærming for å redusere cellebehovet).

2.6 Numerisk beregningsmetode

For å beregne fri vannoverflate benyttes "One fluid, free surface" og for momentumadveksjon benyttes "Second order monotonicity preserving" (2. ordens i rom og 1. ordens i tid).

For å ta hensyn til ulik tetthet benyttet vi: "Density evaluated as function of other quantities", der skalaren som påvirker tettheten var salt. For salt ble molekylær diffusjonskoeffisient satt til 1×10^{-9} og den turbulente diffusjonen ble satt til å være lik som for vann (*turbulent diffusion multiplier* = 1).

Øvrig modelloppsett er standard modell- og parameteroppsett i Flow-3D.

2.7 Beregningsfilosofi og praktisk gjennomføring av beregningene

Å beregne en strøm av ferskvann ut i en fjord med saltvann førte med seg spesielle problemer.

Når vi beregner strømmingen i en elv eller over et flomløp, så vil vi kjøre beregningene til de har blitt stabile. Vi kan f.eks. holde en fast vannstand i magasinet og kjøre beregningene til vannføringen over flomløpet ikke endrer seg lengre. Da vet vi at beregningen har konverget.

I dette tilfellet var det ikke praktisk mulig å kjøre beregningene til modellen ble stabil. Det lengre tid vi kjørte modellen, det mer ferskvann fikk vi i fjorden, og innholdet av ferskvann påvirker beregningene. Resultatene konvergerer derfor ikke mot en konstant verdi, men endres gradvis med mengden ferskvann.

Skulle vi unngått dette måtte vi satt grensebetingelsen mot fjorden (y_{maks}) slik at vi fikk riktig utstrømning av ferskvann og riktig innstrømning av saltvann over grensen. Men vi har ikke tilstrekkelig informasjon om strømmingen langt ute i fjorden, den bestemmes av forhold utenfor det området vi har mulighet til å modellere.

For å håndtere dette problemet valgte vi følgende tilnærming:

1. Vi plasserte grensen mot fjorden (y_{maks}) så langt unna utløpet at det vil ta lang tid før strømmingen blir påvirket av det som skjer ved den grensen. Det er ca. 500 m fra tunnelutløpet til grensen mot fjorden. Dette er ikke så mye lengre enn det området vi er interessert i (300 m), men fordi strømmen fra tunnelen er parallell med grensen, tar det likevel lang tid før strømmingen påvirkes av grensen.
2. Vi satte grensen slik at den hadde riktig vannstand (-1,04 moh.) og tetthetsfordeling pga. saltinnhold som beskrevet i kapittel 2.3.3.

- Vi kjørte beregningene til vi hadde tilnærmet stabile forhold i det området det etterspørres data for, dvs. ut til 300 m fra tunnelutløpet.

Vi startet altså beregningene med vannivå og tetthetsfordeling i fjorden som beskrevet tidligere, og kjørte beregningene lenge nok til at hastigheten ble omtrent stabil ut til 300 m fra tunnelåpningen.

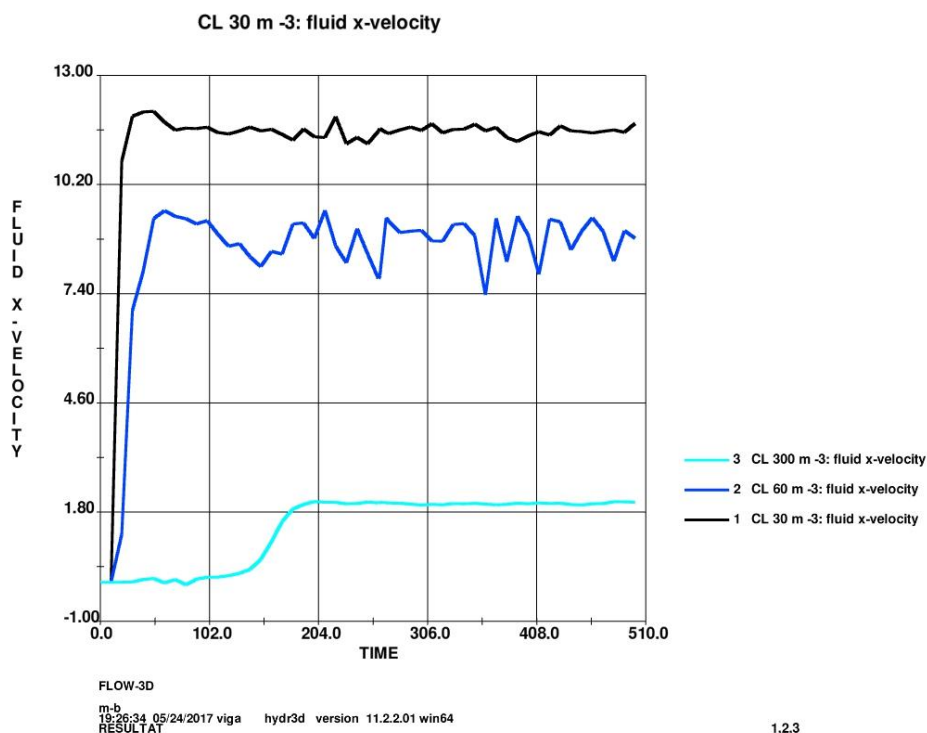
Figur 13 viser dette for 500 m³/s. Grafen viser hastigheten i x-retningen som funksjon av tiden for tre punkt i økende avstand fra utløpet. For punktet 300 m fra utløpet tar det ca.150 sekund fra beregningen begynner til hastigheten begynner å øke. Etter ca. 200 sekund er hastigheten omtrent stabil.

Beregningen ble kjørt til 500 sekund, og resultatene ble brukt som grunnlag for beregning med et finere gitter.

Et finere gitter (mindre celler) gir en mer nøyaktig beregning og et mer detaljert resultat, f.eks. flere punkt med hastighet over dybden, altså et mer detaljert profil.

Ulempen med små celler er at beregningene tar mye lengre tid. Vi måtte derfor begrense bruken av gitter med små celler. Beregningene ble derfor først kjørt med middels til store celler til resultatet var stabilt. Deretter ble beregningene kjørt videre med små celler i 200 sekunder.

Vi gjorde tilsvarende for vannføring på 75 m³/s og 37,5 m³/s, men beregningstiden var lengre.



Figur 13 Q = 500 m³/s. Hastigheten som funksjon av tiden for tre punkt i tunnelens senterlinje, 30 m, 60 m og 300 m fra utløpet, kote -3,0 moh.

3 Resultatene

3.1 Generelt om presentasjon av resultatene

For hver vannføring er beregningsresultatene presentert som følger:

1. Et oversiktskart som viser hastigheten i et lag rett under overflaten, på ca. 2 m dyp. Fargene / konturene viser vannhastigheten (*velocity magnitude*). Aksene viser de lokale koordinatene (x, y) som ble brukt i beregningene, i meter.
2. Et utsnitt av kartet fra punkt 1, nær utløpet. Kartutsnittet har i tillegg hastighetsvektorer som viser strømretningen.
3. Et vertikalt snitt i tunnelens senterlinje som viser vannhastigheten i tunnelens lengderetning (*x velocity*), fra utløpet og ca. 300 m utover.
4. Et utsnitt av vertikalsnittet nær tunnelutløpet.
5. Hastighetsprofil (transekt) som viser hastigheten fra overflaten til bunnen i tunnelens senterlinje for følgende avstander fra utløpet: 10 m, 30 m, 60 m, 100 m, 200 m og 300 m. Disse avstandene tilsvarer følgende x-koordinater i beregningsmodellen: 2310, 2330, 2360, 2400, 2500 og 2600. Diagrammets x-akse gir kotehøyden (moh.). Laveste verdi for diagrammets x-akse ligger ikke ved sjøbunnen, men lavere, og derfor er hastigheten lik null i den laveste delen av profilet. (Tabell 1 viser bunnivået for ulike avstander fra utløpet.) y-aksen gir vannhastigheten i tunnelens lengderetning (*x-velocity*).

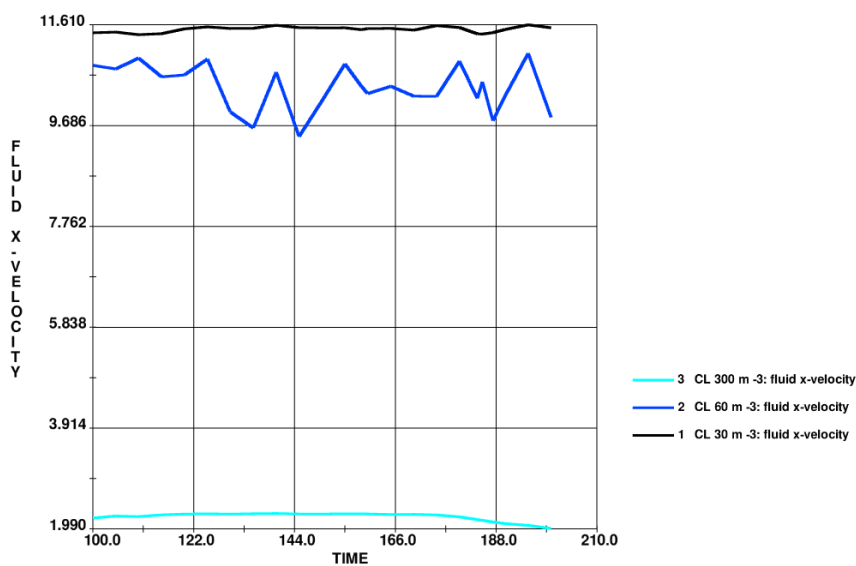
x-koordinat (m)	Avstand fra tunnelutløp (m)	Bunnivå (moh.)
2300	0	-5
2310	10	-5
2330	30	-7
2360	60	-20
2400	100	-26
2500	200	-33
2600	300	-36

Tabell 1 Bunnivå i tunnelens senterlinje

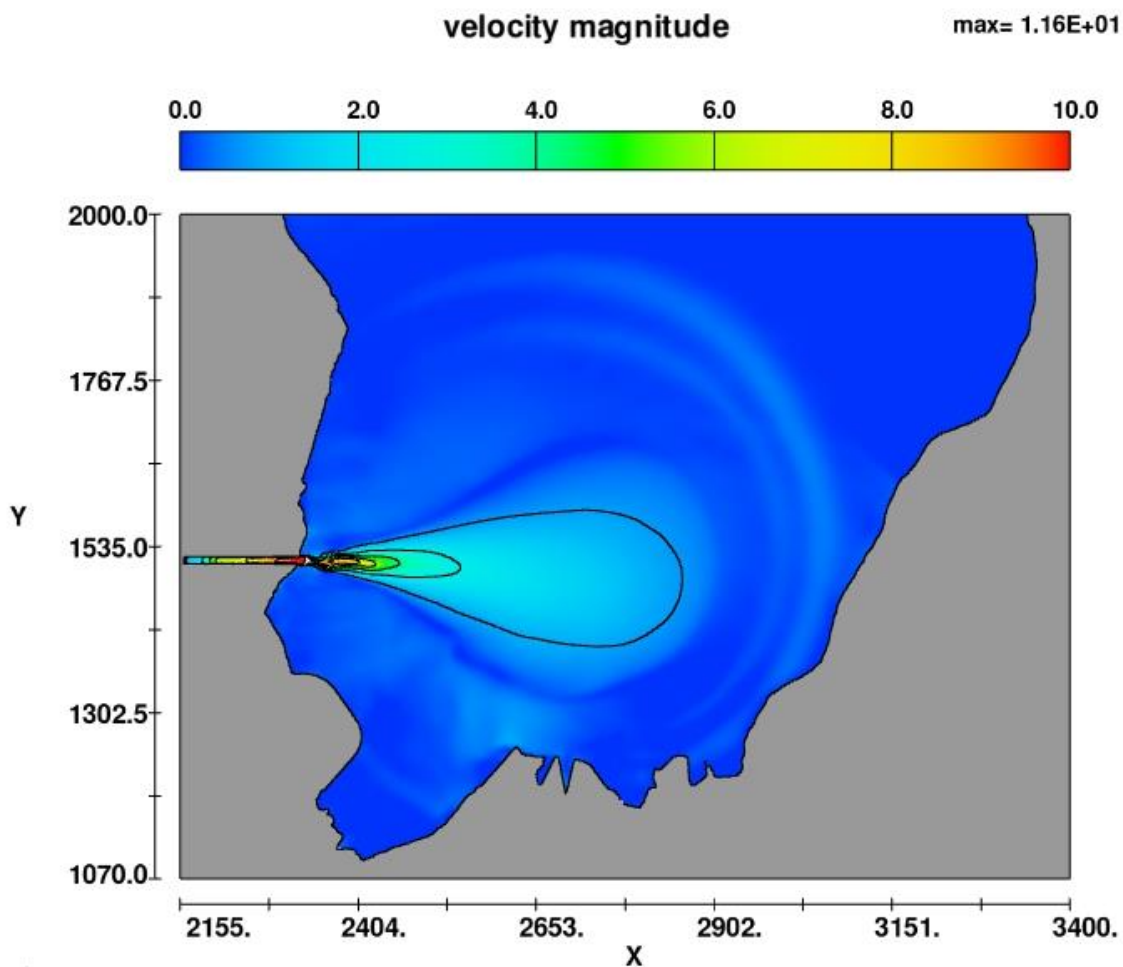
3.2 Maksimal flomvannføring, $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

Beregningen ble kjørt i 500 sekunder, til strømmingen ved utløpet hadde stabilisert seg som vist på Figur 13. Deretter fortsatte beregningene i 200 sekunder med det fineste gitteret (0,625 m). Utviklingen i hastighet er vist på figuren under.

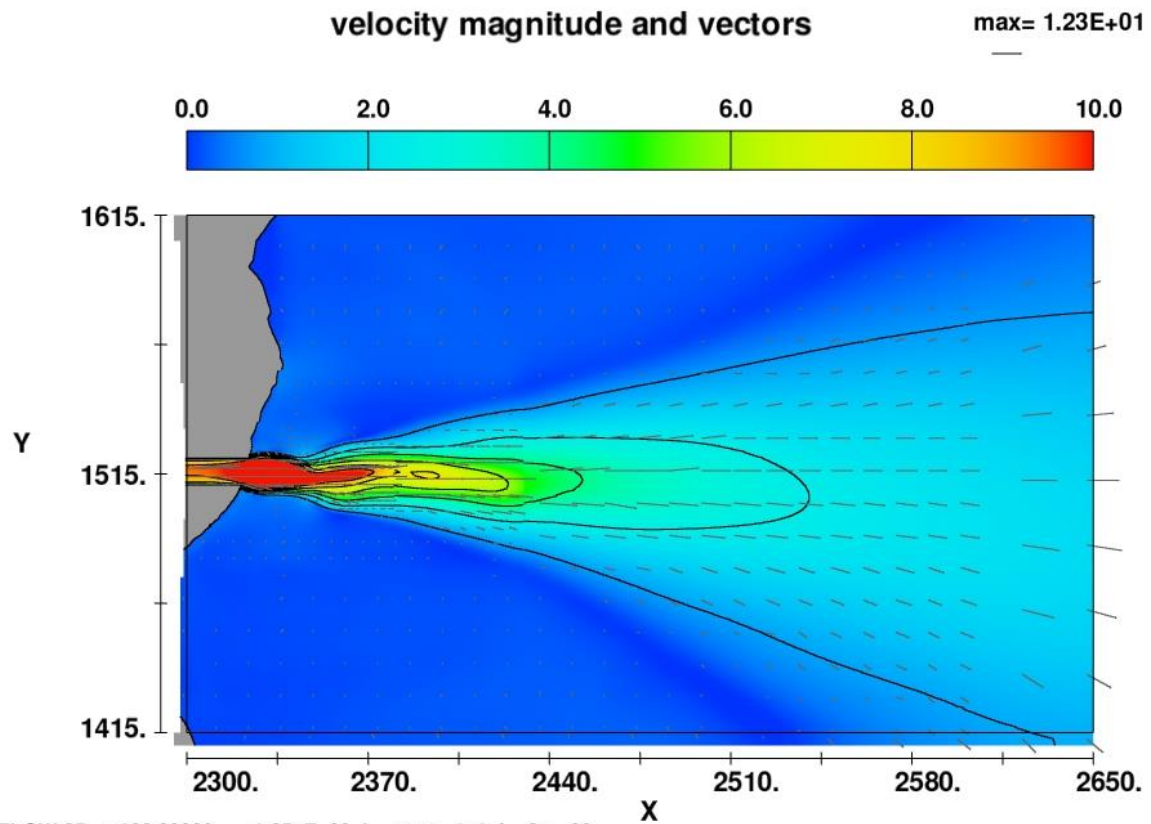
Resultatene på de neste sidene er fra slutten av beregningsperioden (500 + 200 s).



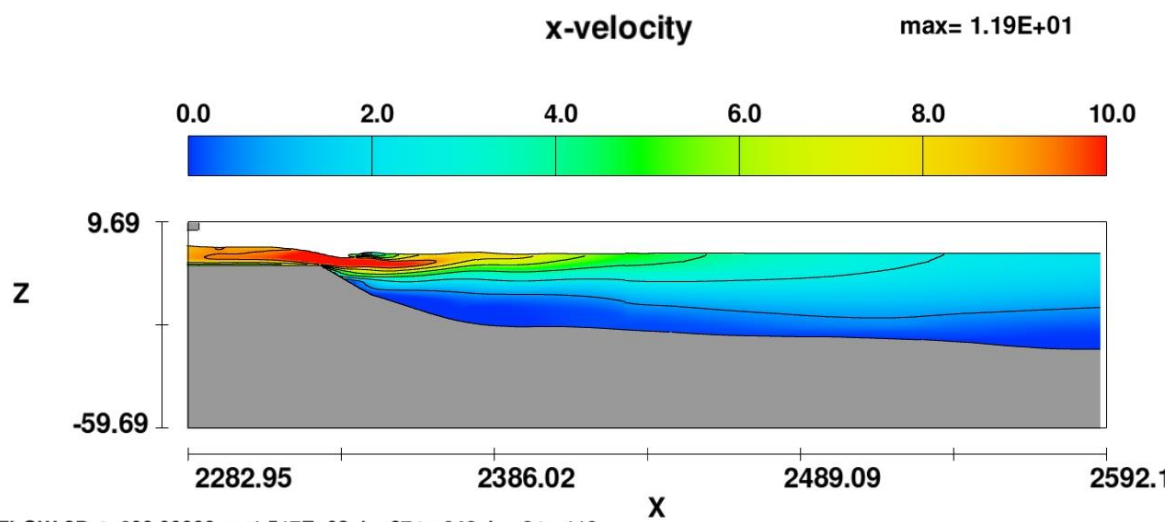
Figur 14 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$. Hastigheten som funksjon av tiden for tre punkt i tunnelens senterlinje, 30 m, 60 m og 300 m fra utløpet, kote -3,0 moh.



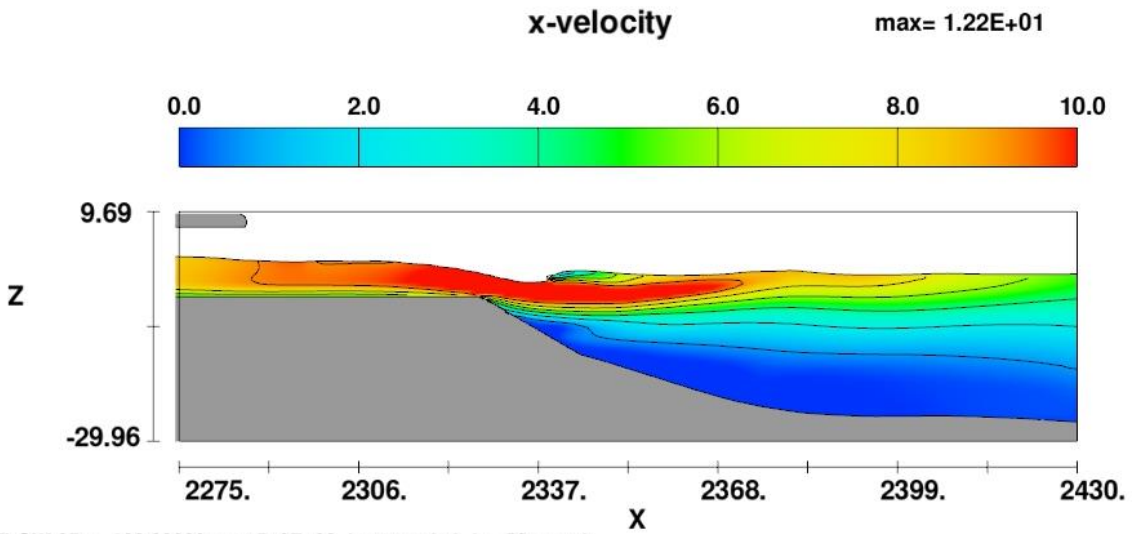
Figur 15 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, oversiktskart som viser vannhastigheten (m/s) på ca. 2 m dyp.



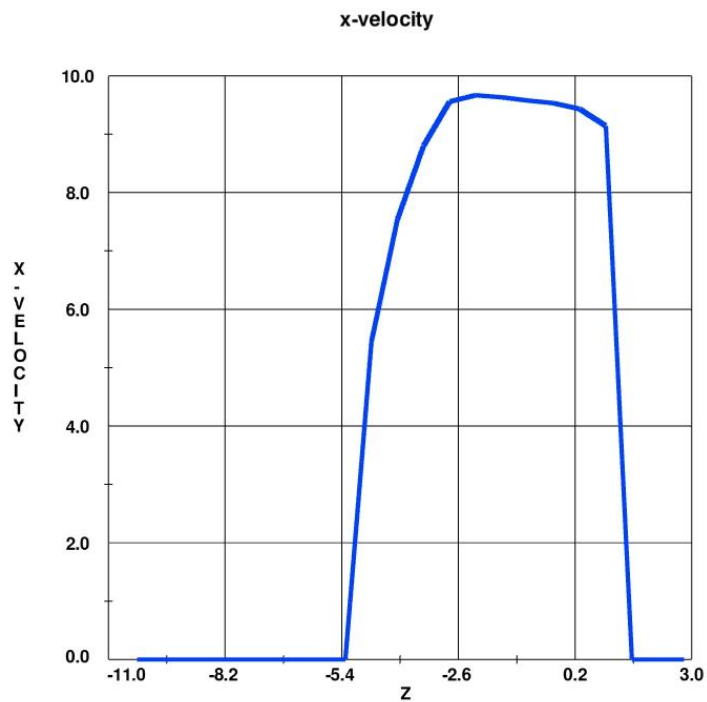
Figur 16 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, detaljkart med vektorer som viser vannhastigheten (m/s) på ca. 2 m dyp



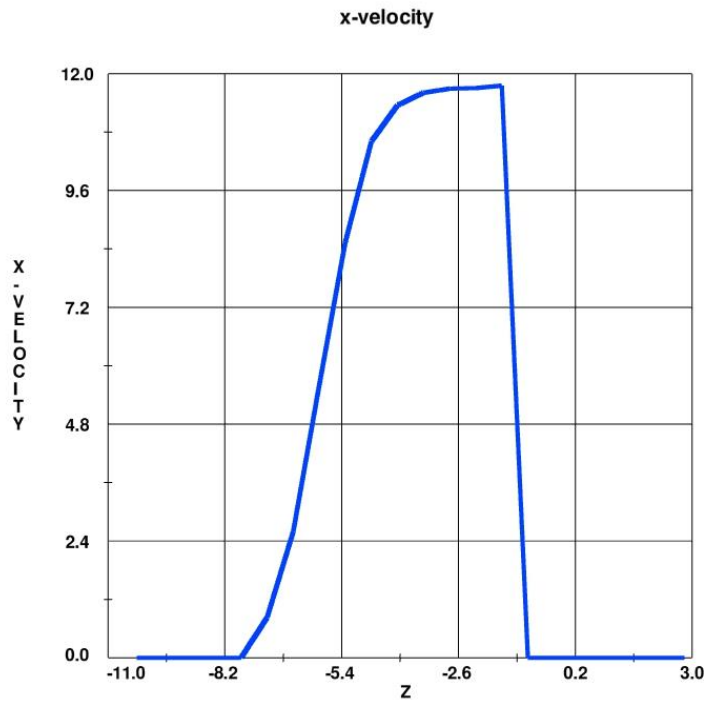
Figur 17 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, lengdesnitt som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje, fra utløpet og ca 300 m utover



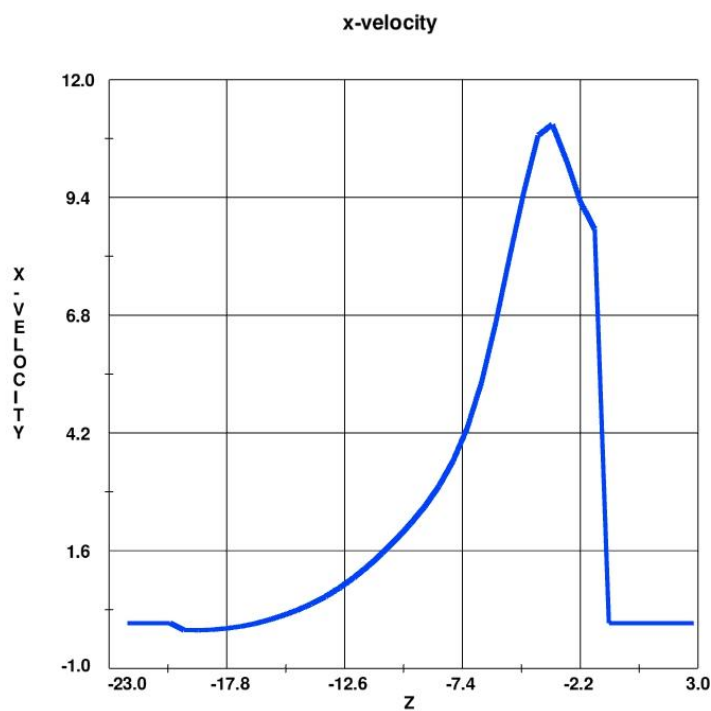
Figur 18 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, lengdesnitt som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje, fra utløpet og ca 130 m utover



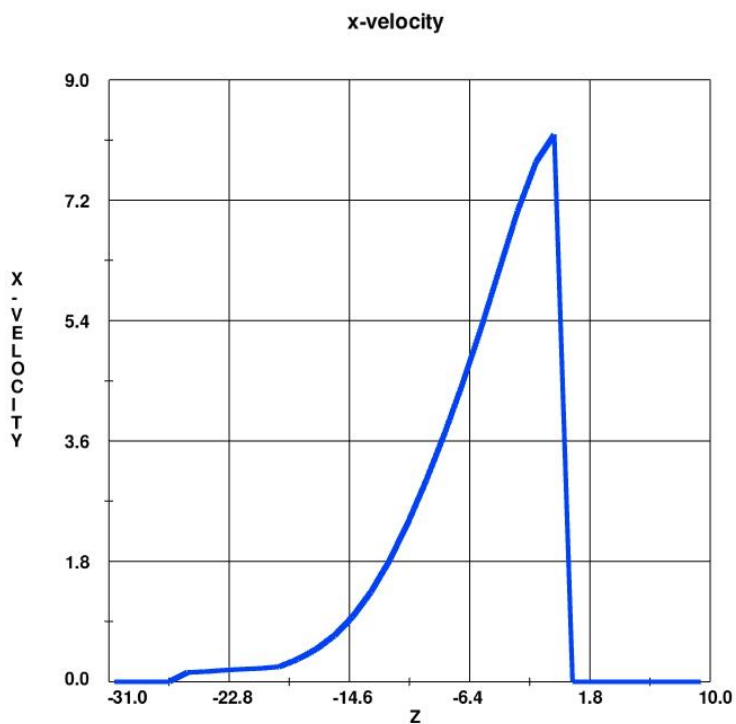
Figur 19 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 10 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2310 \text{ m}$)



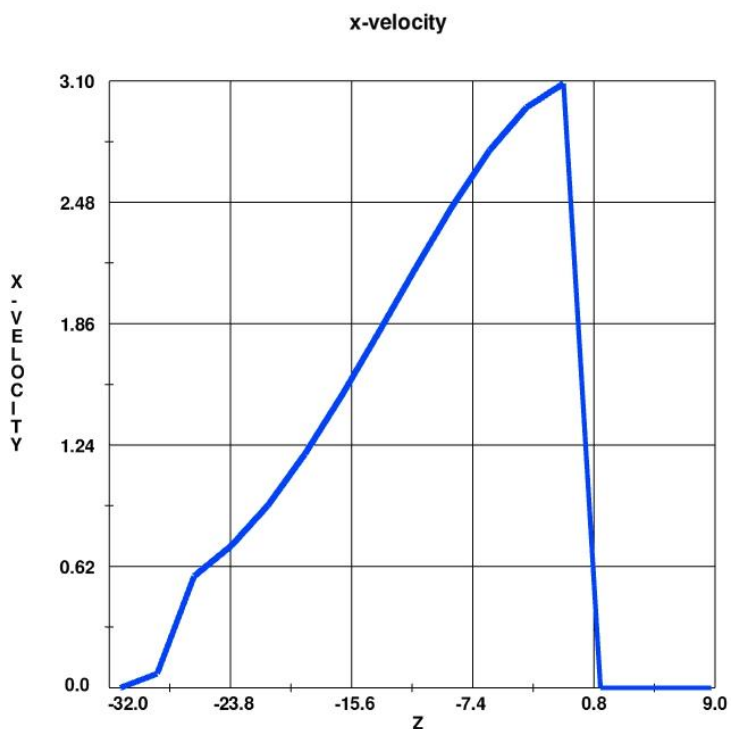
Figur 20 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 30 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2330 \text{ m}$)



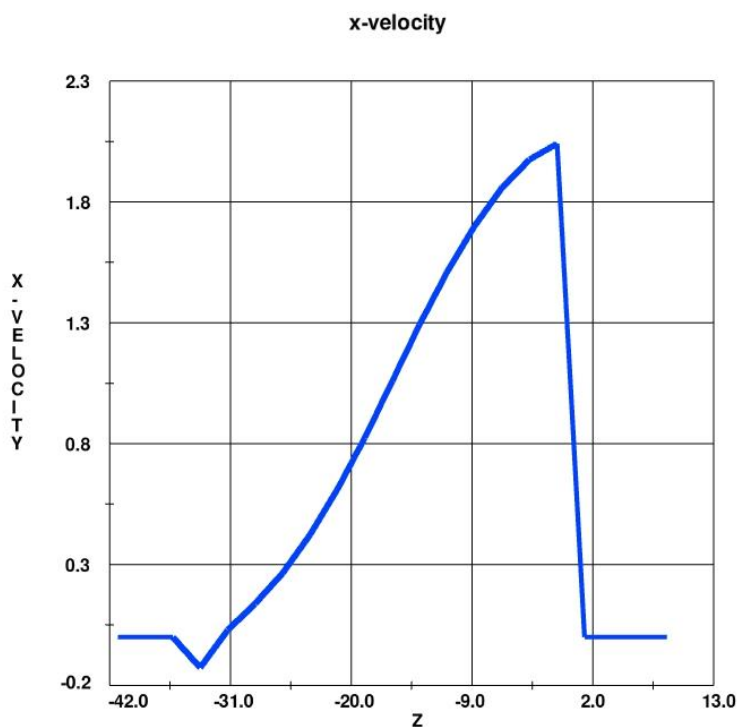
Figur 21 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 60 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2360 \text{ m}$)



Figur 22 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 100 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2400 \text{ m}$)



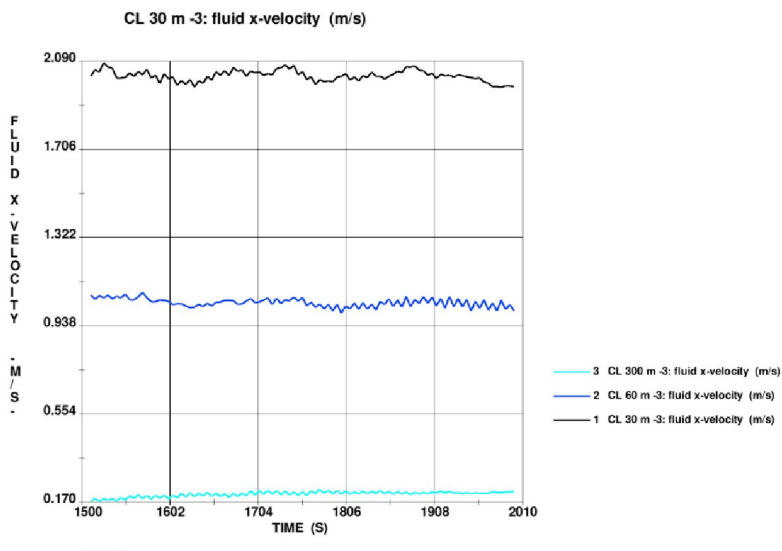
Figur 23 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 200 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2500 \text{ m}$)



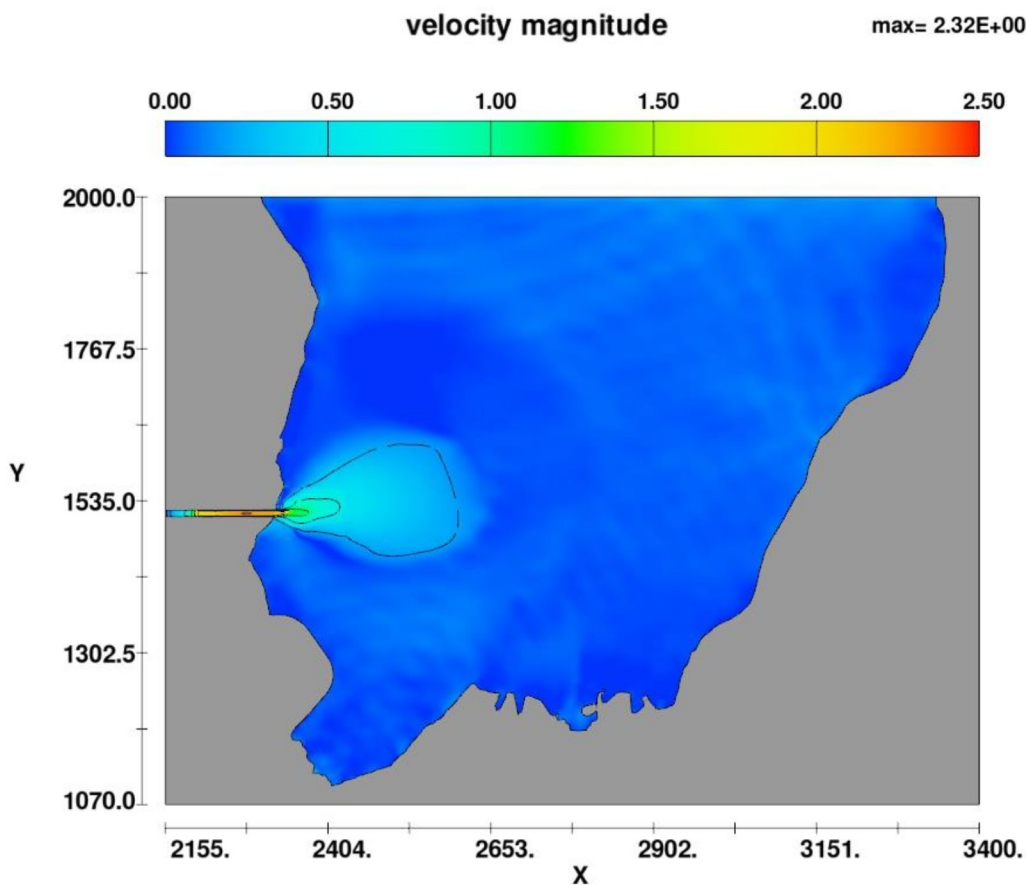
Figur 24 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 300 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2600 \text{ m}$)

3.3 Vanlig driftsvannføring, $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$

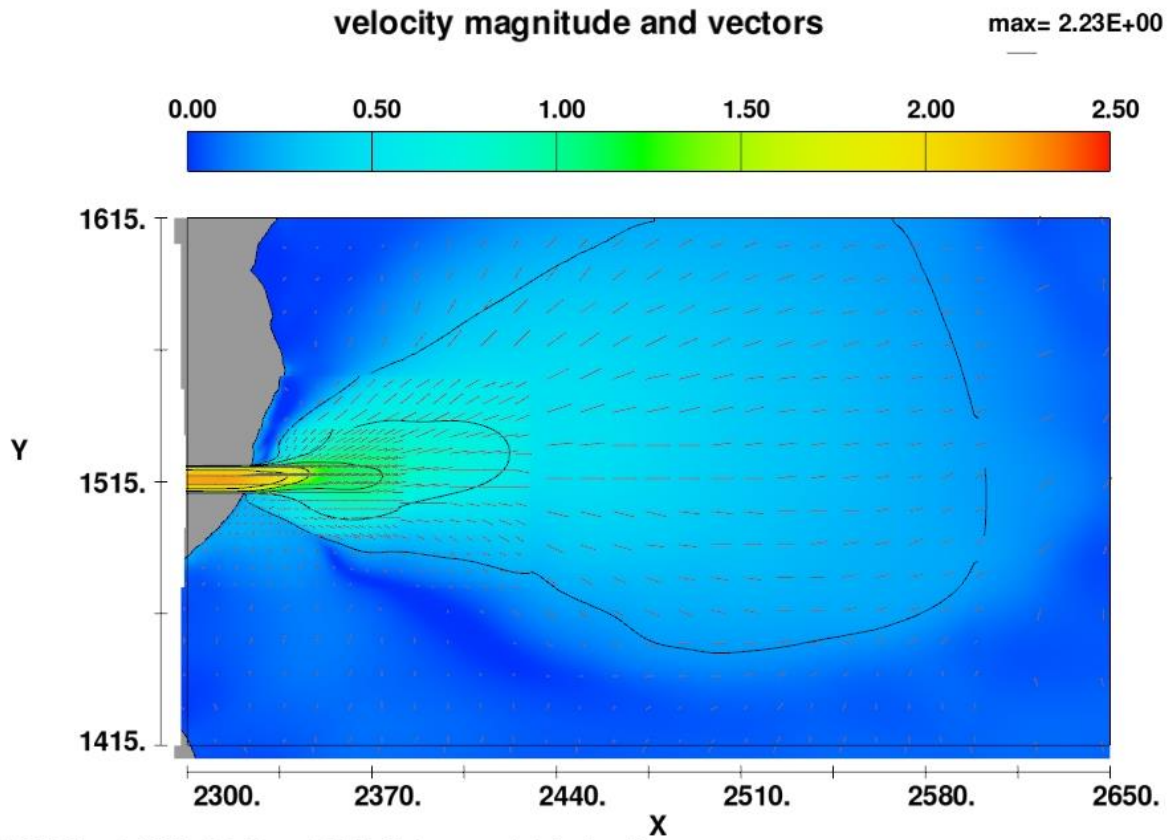
Beregningen ble kjørt i 2000 sekunder med det fineste gitteret, til strømmingen ved utløpet hadde stabilisert seg som vist på Figur 25. Figurene under viser resultatene.



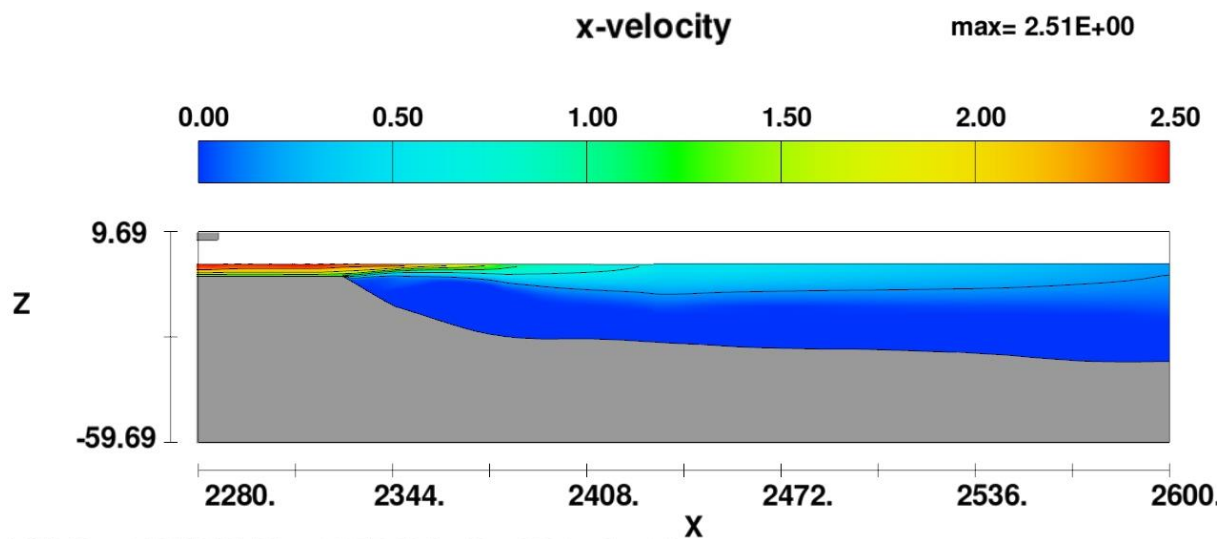
Figur 25 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$. Hastigheten som funksjon av tiden for tre punkt i tunnelens senterlinje, 30 m, 60 m og 300 m fra utløpet, kote -3,0 moh.



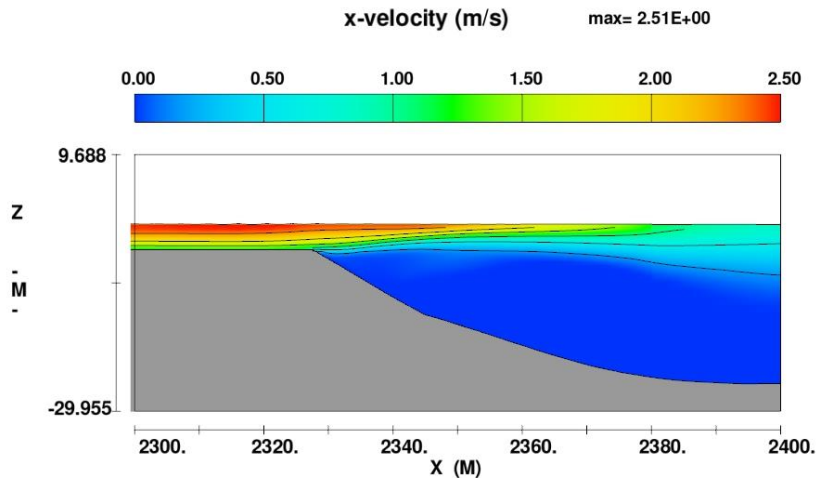
Figur 26 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, oversiktskart som viser vannhastigheten (m/s) på ca. 2 m dyp.



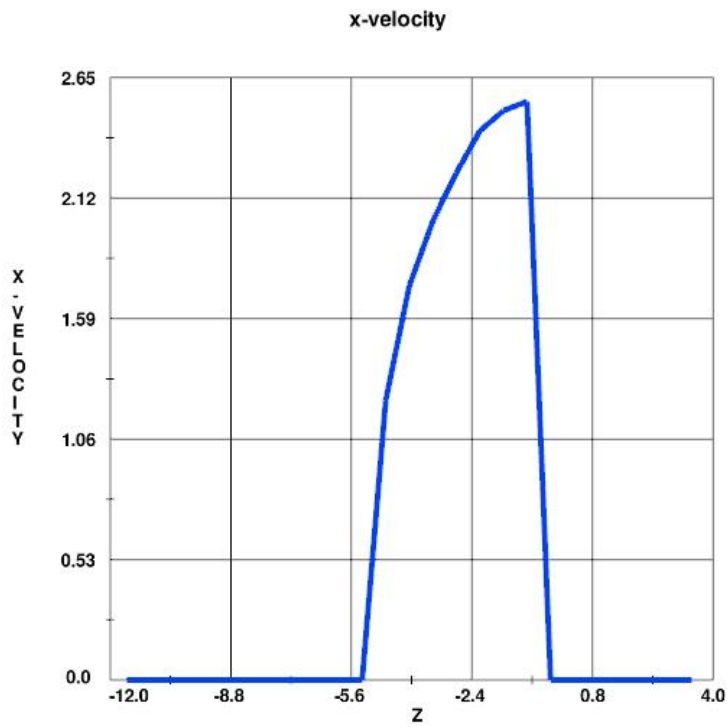
Figur 27 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, detaljkart med vektorer som viser vannhastigheten (m/s) på ca. 2 m dyp



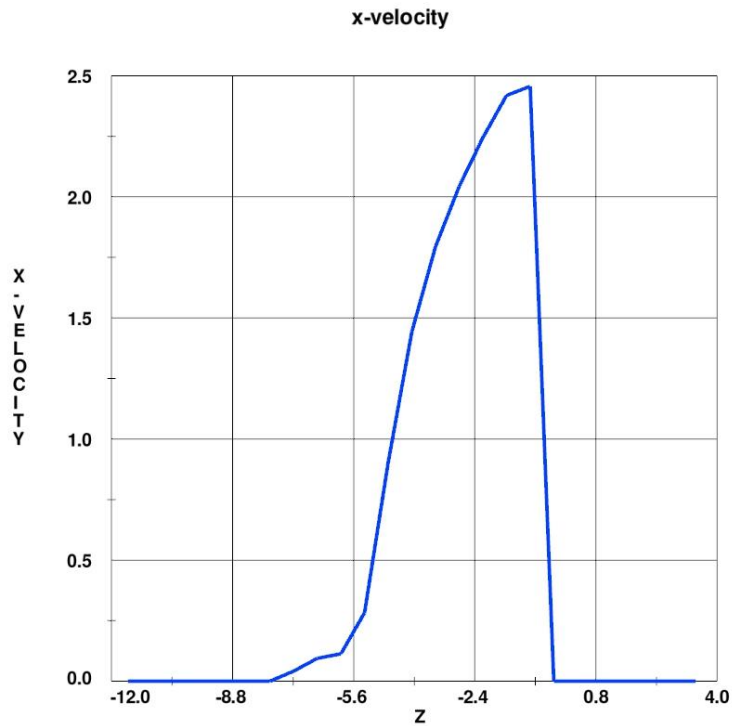
Figur 28 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, lengdesnitt som viser vannhastigheten (m/s) i x-retningen i tunnelens senterlinje. Fra utløpet og ca. 300 m utover.



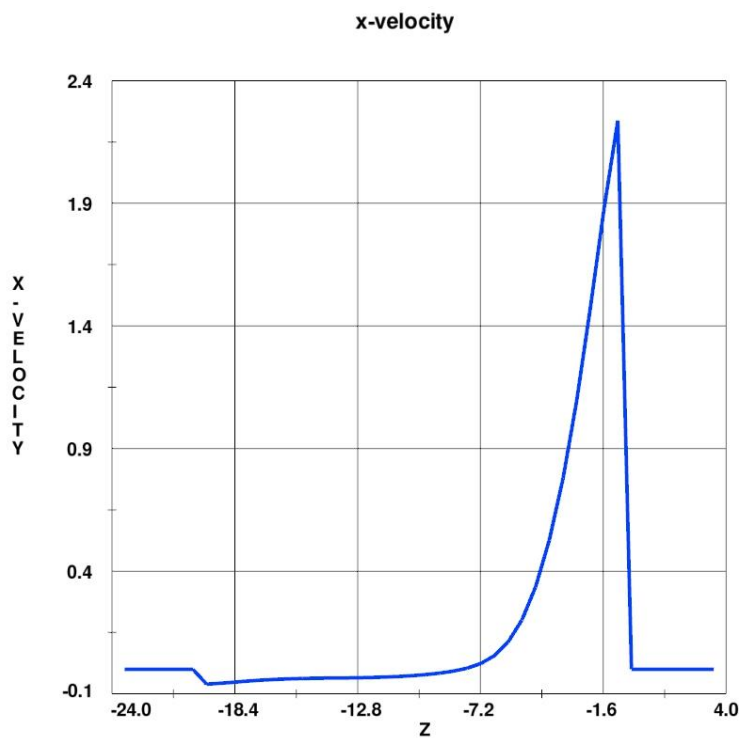
Figur 29 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, lengdesnitt som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje, fra utløpet og ca. 100 m utover



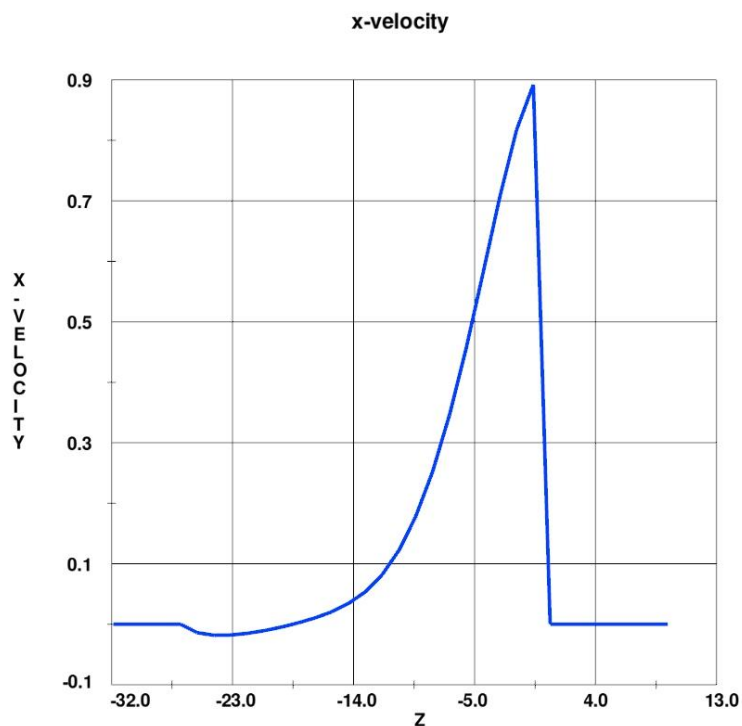
Figur 30 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 10 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2310 \text{ m}$)



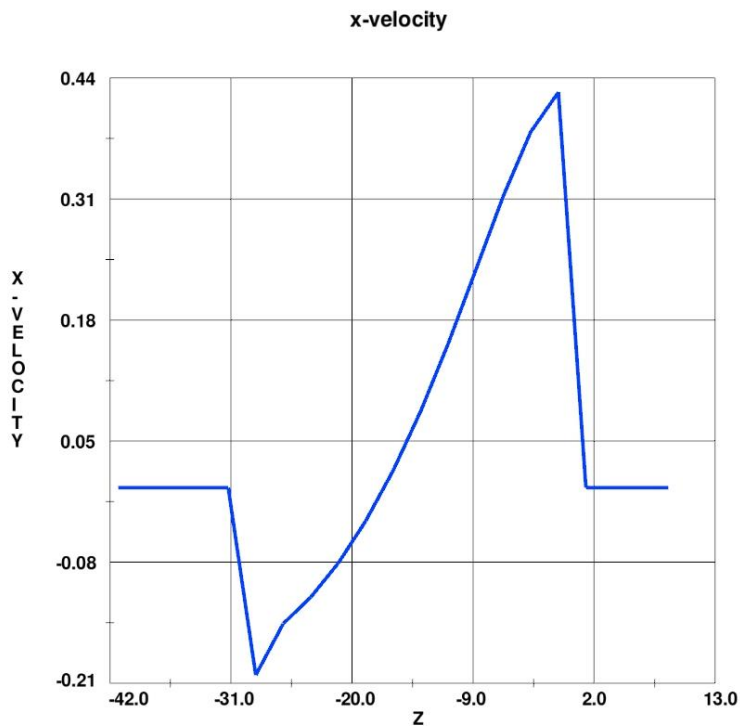
Figur 31 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 30 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2330 \text{ m}$)



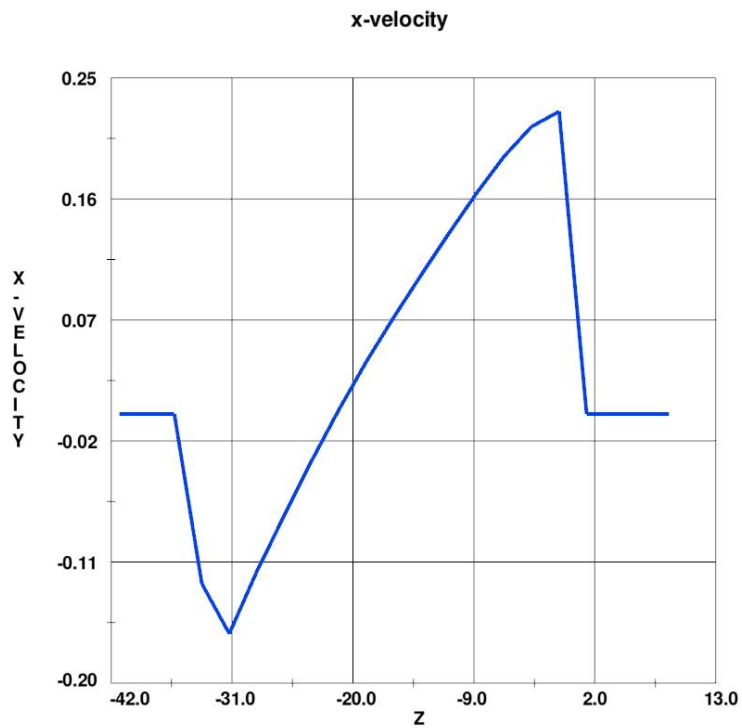
Figur 32 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 60 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2360 \text{ m}$)



Figur 33 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 100 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2400 \text{ m}$)



Figur 34 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 200 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2500 \text{ m}$)



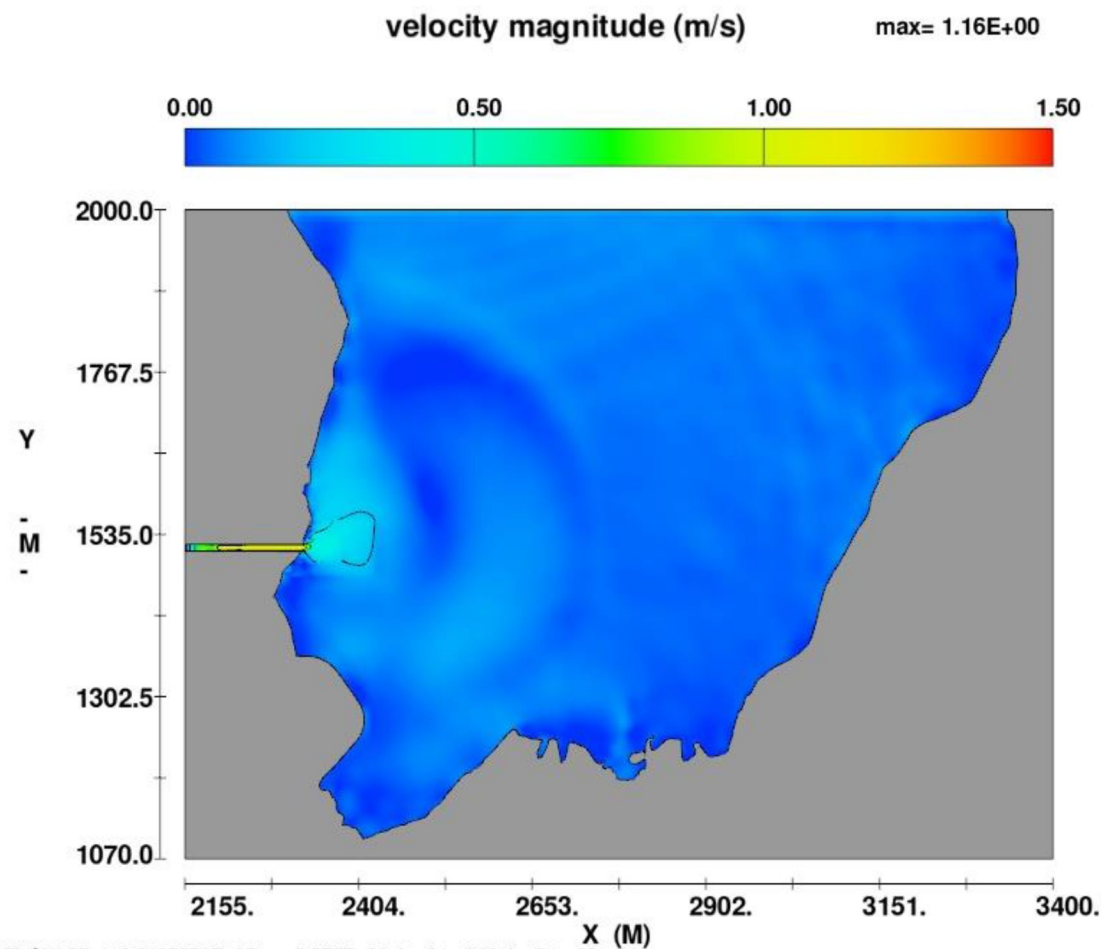
Figur 35 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 300 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2600 \text{ m}$)

3.4 Halv driftsvannføring, $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$

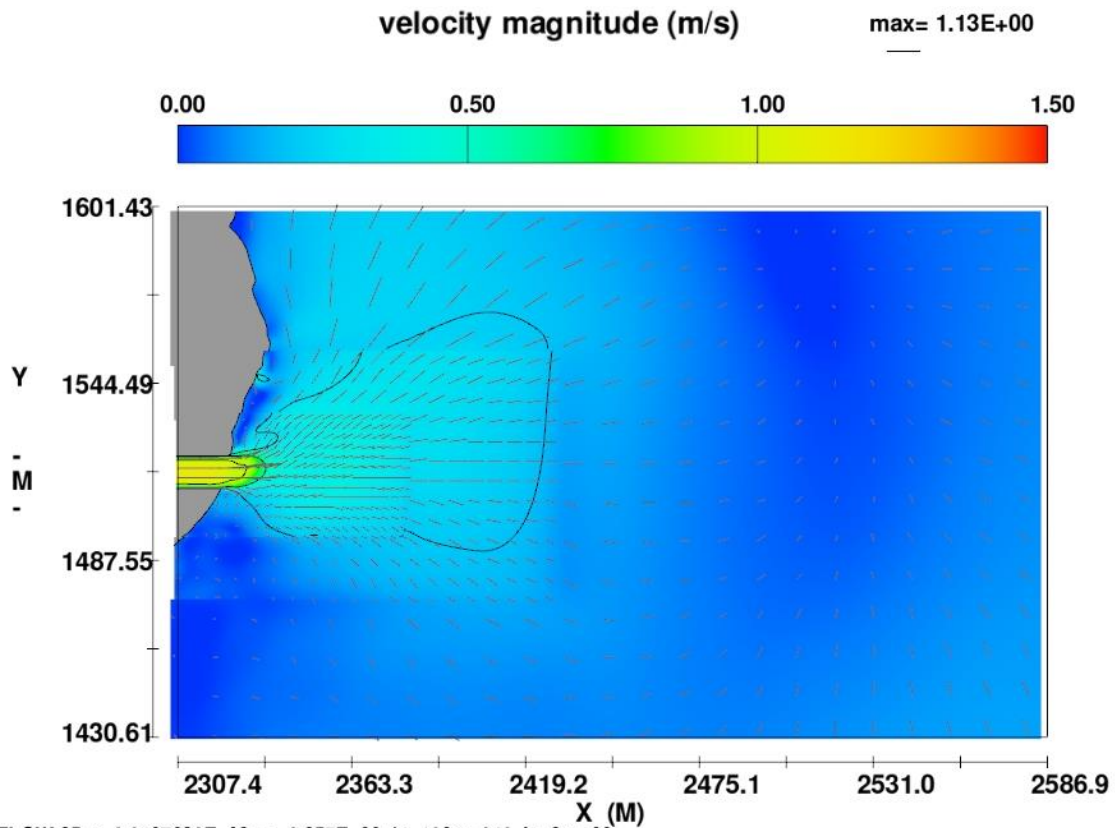
Beregningen ble kjørt i 2200 sekunder med det fineste gitteret, til strømmingen ved utløpet hadde stabilisert seg som vist på Figur 36. Figurene under viser resultatene.



Figur 36 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Hastigheten som funksjon av tiden for tre punkt i tunnelens senterlinje, 30 m, 60 m og 300 m fra utløpet, kote -3,0 moh.

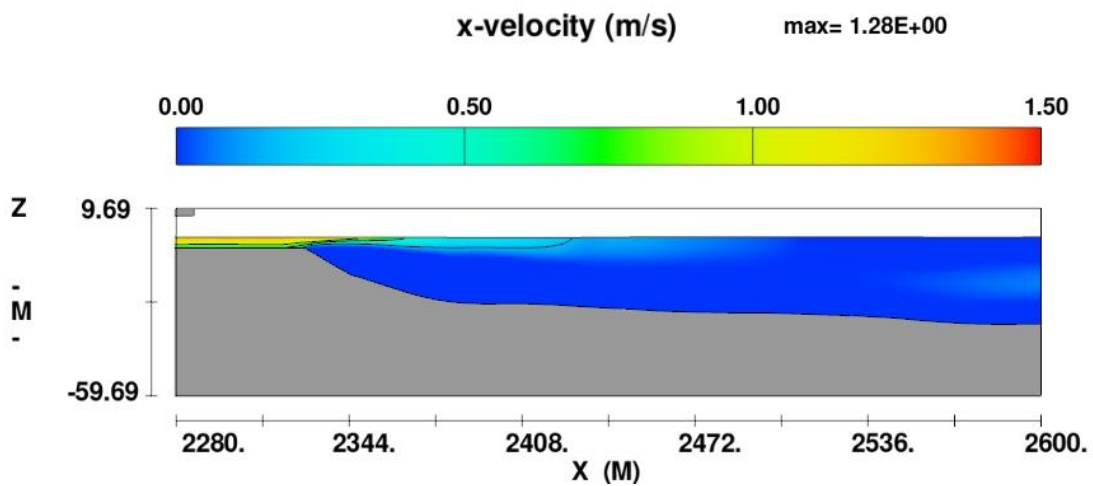


Figur 37 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, oversiktskart som viser vannhastigheten (m/s) på ca. 2 m dyp.

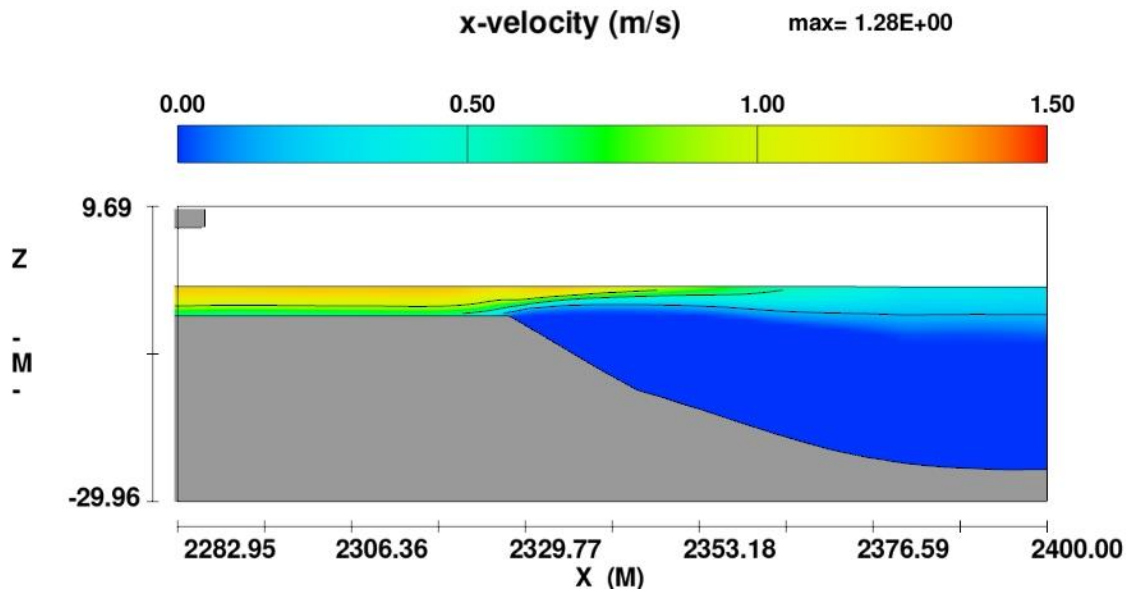


FIGUR 38 Q = 37,5 m³/s, detaljkart med vektorer som viser vannhastigheten (m/s) på ca. 2 m dyp

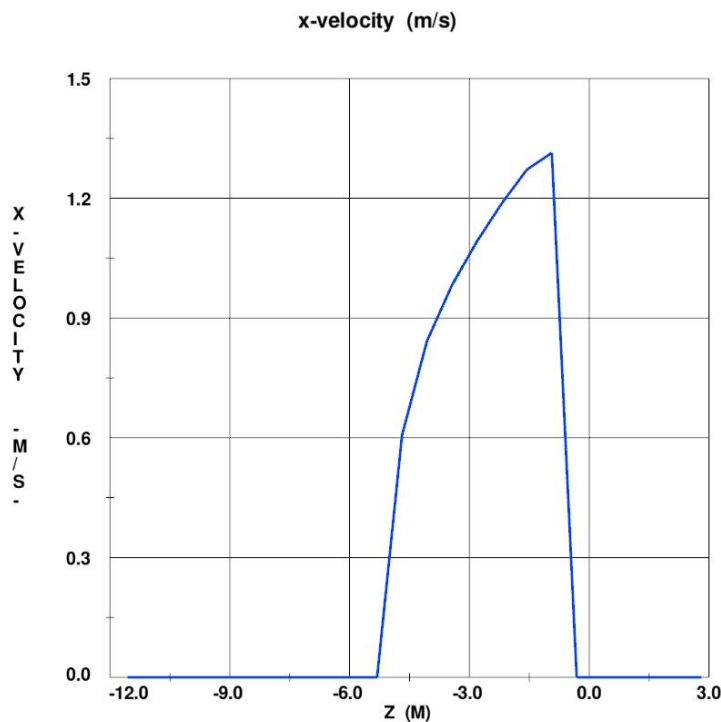
Figur 38 Q = 37,5 m³/s, detaljkart med vektorer som viser vannhastigheten (m/s) på ca. 2 m dyp



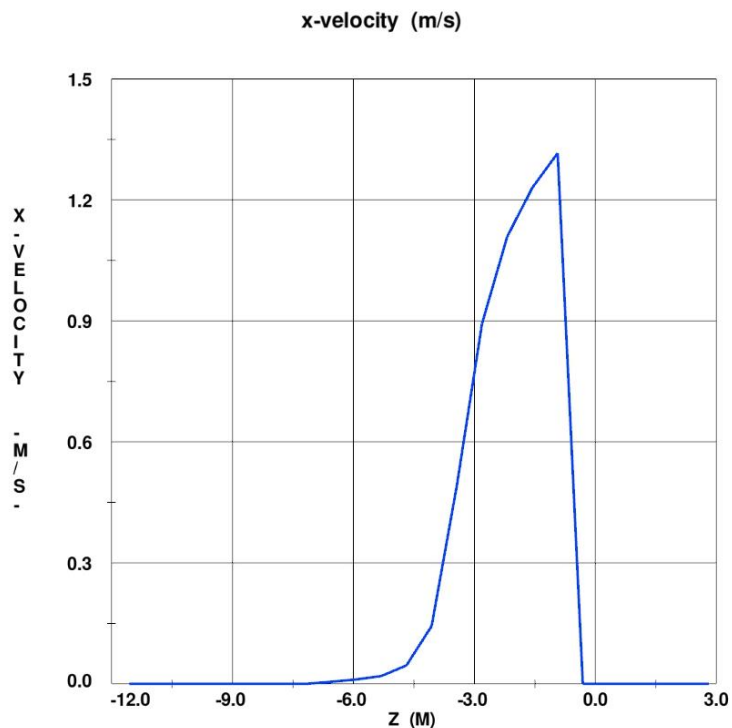
Figur 39 Q = 37,5 m³/s, lengdesnitt som viser vannhastigheten (m/s) i x-retningen i tunnelens senterlinje. Fra utløpet og ca. 300 m utover.



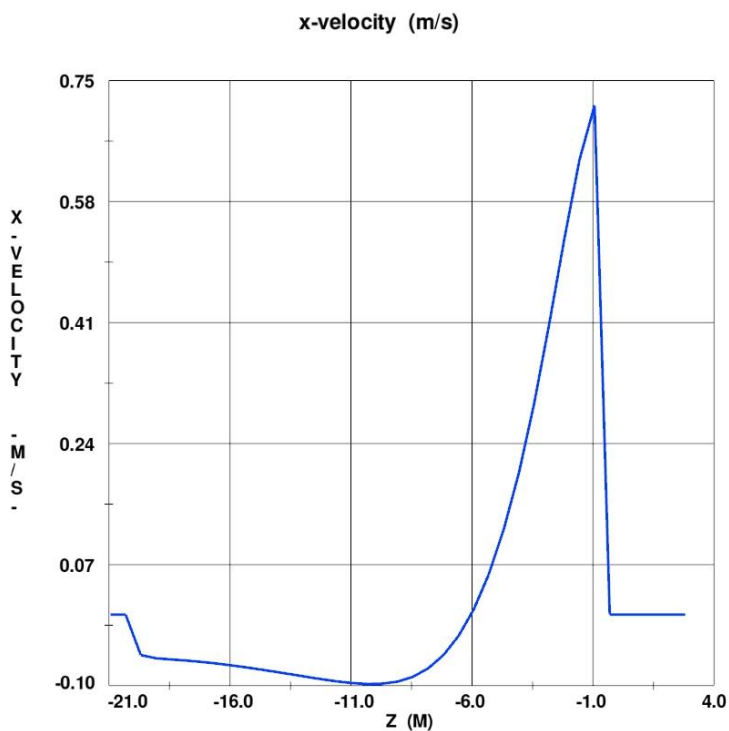
Figur 40 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, lengdesnitt som viser vannhastigheten (m/s) i x-retningen i tunnelens senterlinje. Fra utløpet og ca. 100 m utover.



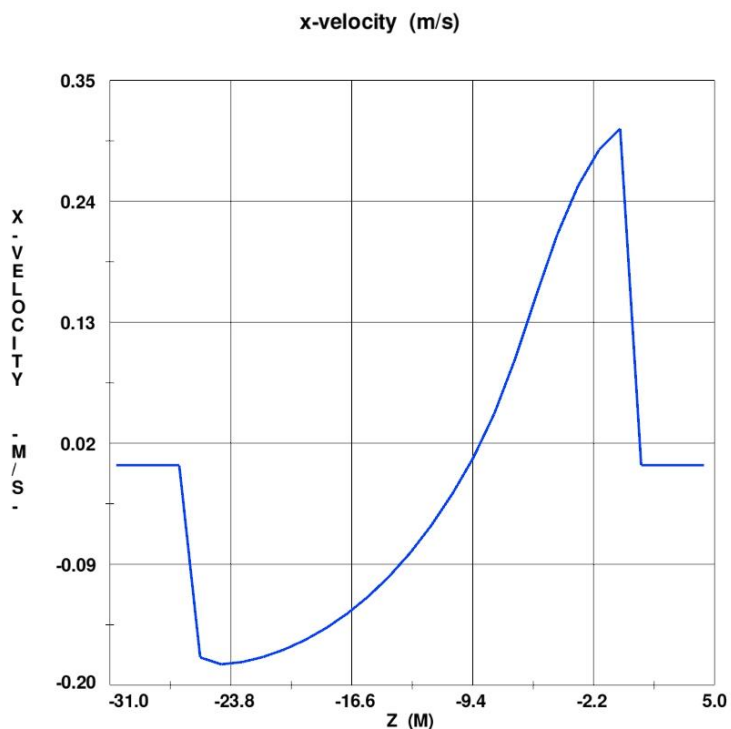
Figur 41 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 10 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2310 \text{ m}$)



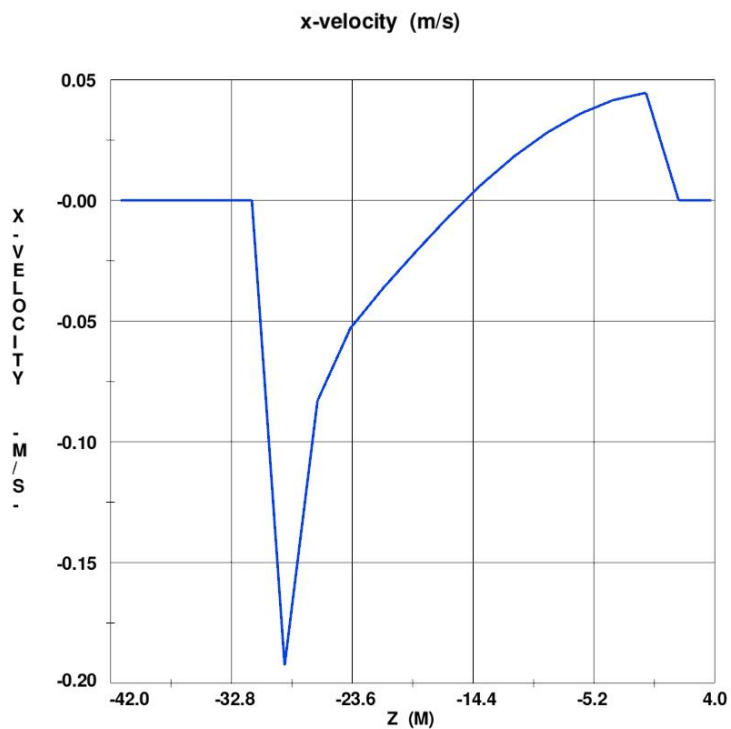
Figur 42 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 30 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2330 \text{ m}$)



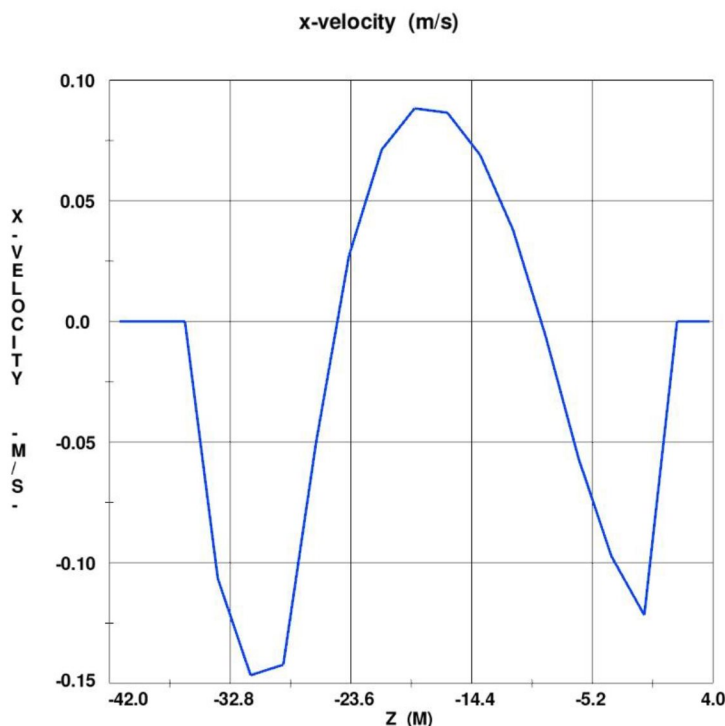
Figur 43 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 60 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2360 \text{ m}$)



Figur 44 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 100 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2400 \text{ m}$)



Figur 45 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 200 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2500 \text{ m}$)



Figur 46 $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$, profil (bunn til overflate) som viser vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje. 300 m utenfor tunnelutløpet ($x = 2600 \text{ m}$)

3.5 Tilleggsresultat, hastighet ved to valgte punkt

Etter at rapporten var levert etterspurte Sweco hastighetsdata for $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ for de to punkter som er vist på Figur 47.

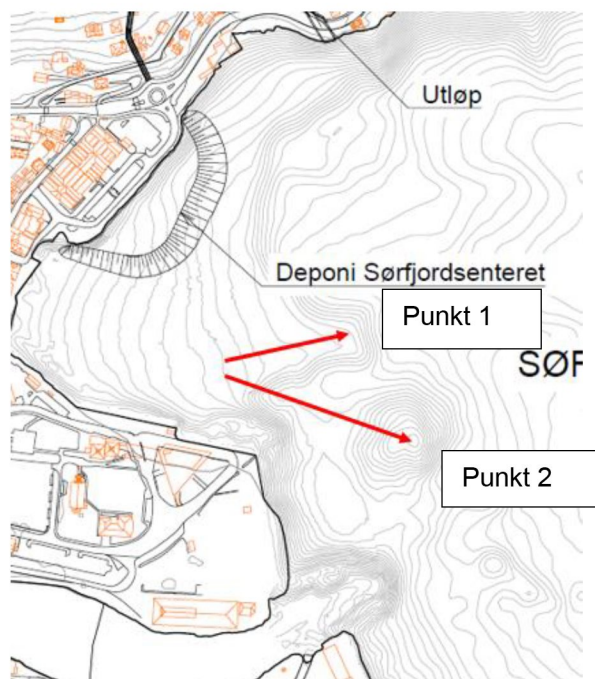
Følgende data er tatt ut og vist på de neste sidene:

1. Kart som viser bunnivået. Hensikten er å gjøre det enklere å orientere seg på hastighetskartet, se neste punkt.
2. Kart som viser hastigheten 1 m over bunnen for det aktuelle området.
3. Hastighetsprofil over dybden i x- og y-retning (to profil for hvert punkt).

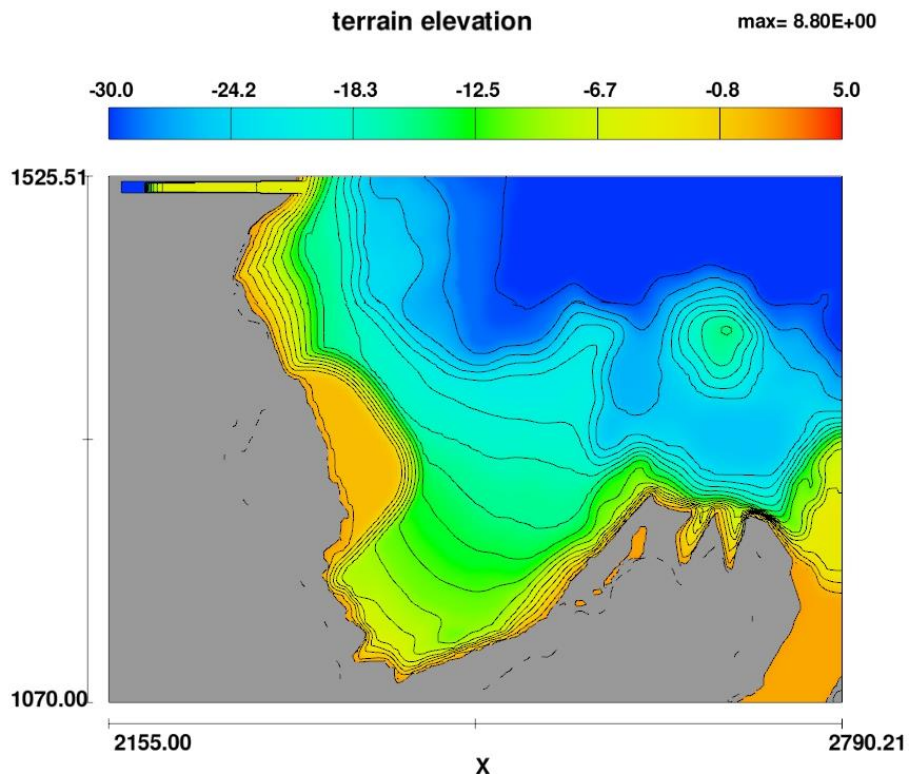
Punktene der hastighetsprofilene er tatt ut er plassert skjønnsmessig ut fra Figur 47.

Vi gjør oppmerksom på at beregningsmodellen har et grovere gitter i dette området enn utenfor utløpet av flomtunnelen. Derfor er hastighetene vi har beregnet her mindre nøyaktige enn hastighetene i tunnelaksen.

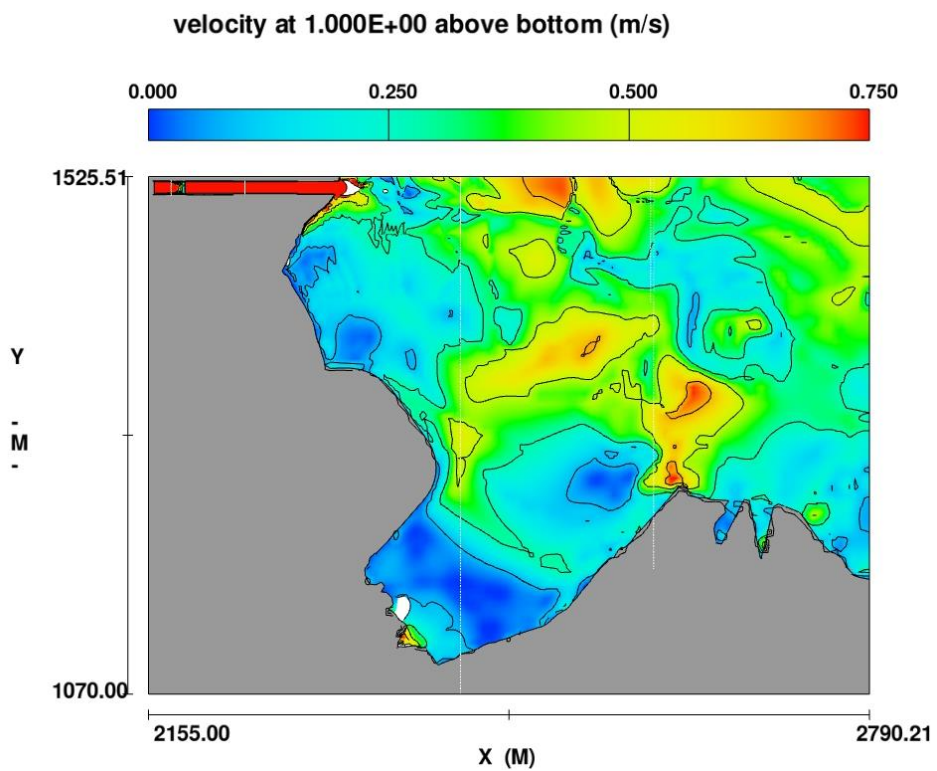
Hvis det er viktig med nøyaktige resultat anbefaler vi å gjøre beregningene med et finere gitter i dette området.



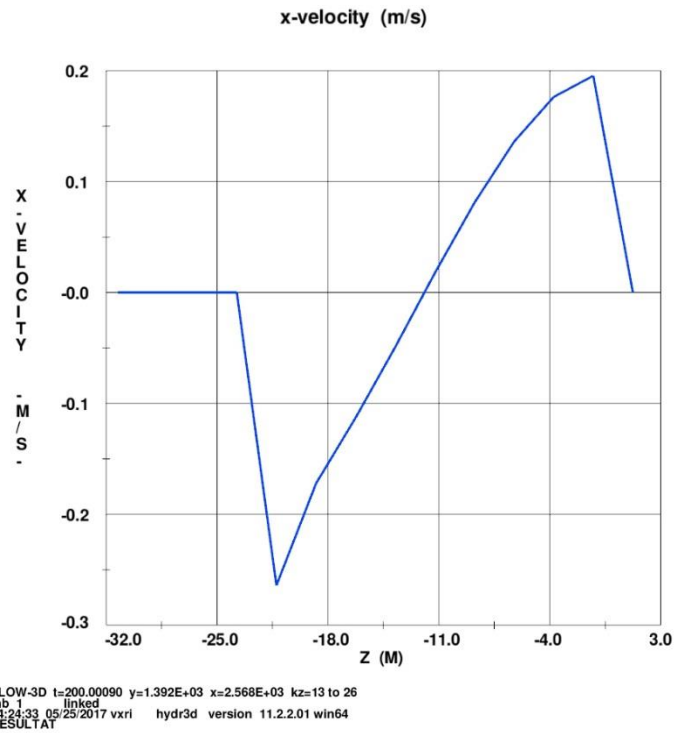
Figur 47 Punkt der det etterspørres ekstra hastighetsdata



Figur 48 Bunnivå (moh.) innerst i Sørfjorden

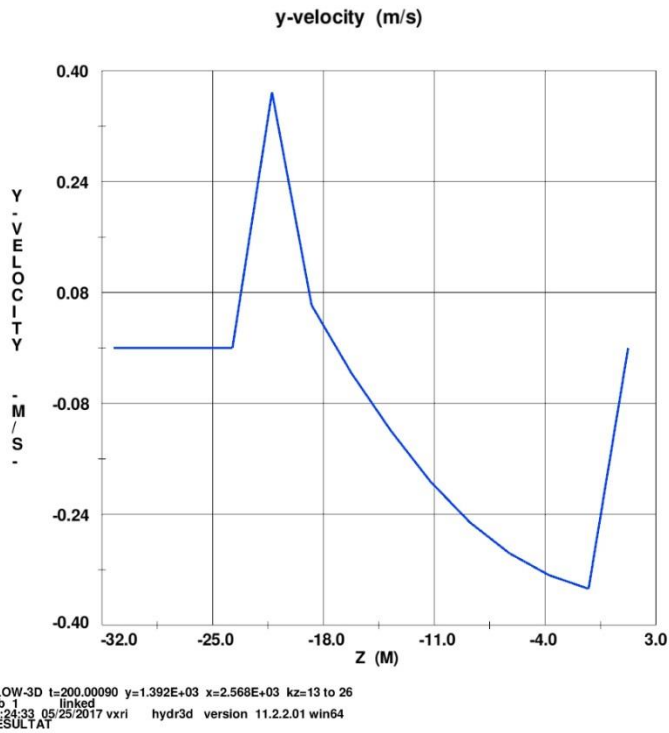


Figur 49 Vannhastighet 1 m over bunnen (m/s)



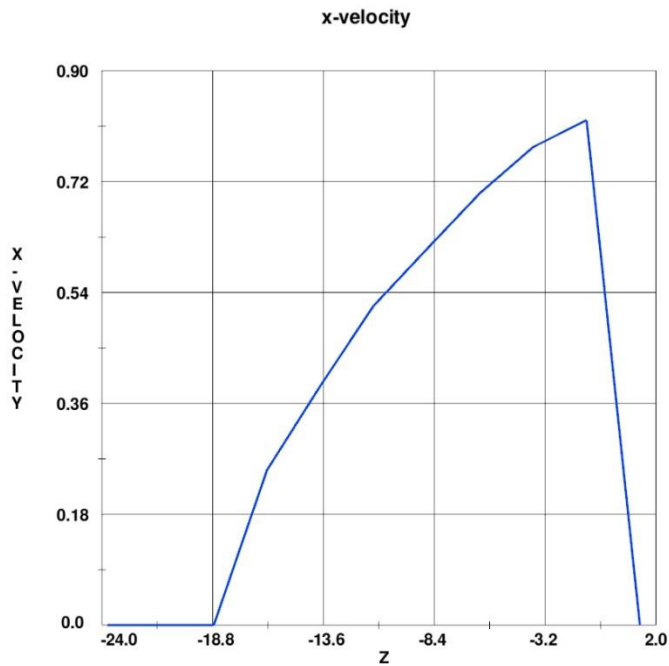
4

Figur 50 Punkt 1, hastighetsprofil over dybden, hastighet i x-retningen



4

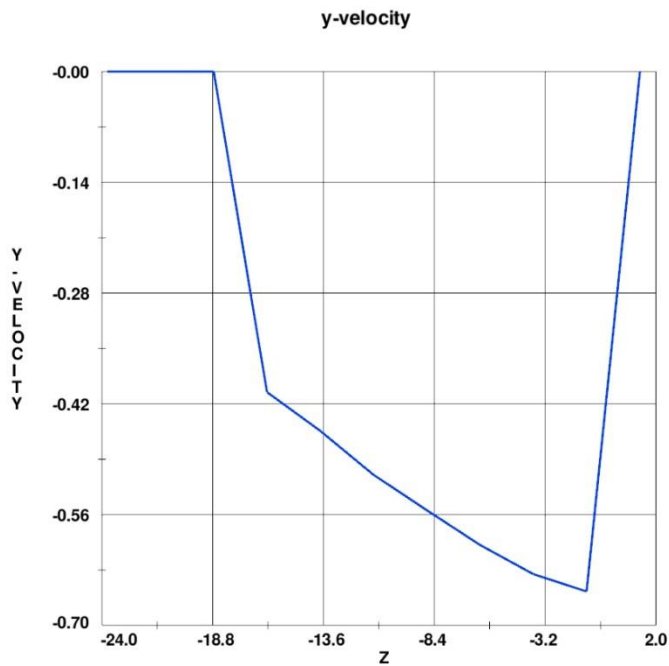
Figur 51 Punkt 1, hastighetsprofil over dybden, hastighet i y-retningen



FLOW-3D t=200.00090 y=1.398E+03 x=2.692E+03 kz=16 to 26
 mb_1 linked
 14:24:33 05/25/2017 vxri hydr3d version 11.2.2.01 win64
 RESULTAT

4

Figur 52 Punkt 2, hastighetsprofil over dybden, hastighet i x-retningen



FLOW-3D t=200.00090 y=1.398E+03 x=2.692E+03 kz=16 to 26
 mb_1 linked
 14:24:33 05/25/2017 vxri hydr3d version 11.2.2.01 win64
 RESULTAT

4

Figur 53 Punkt 2, hastighetsprofil over dybden, hastighet i y-retningen

3.6 Tilleggsresultat, hastigheten nær bunnen

I februar 2018 etterspurte Sweco mer detaljert informasjon om vannhastigheten nær bunnen for vannføring på 75 m³/s og 500 m³/s.

Fra beregningsresultatene har vi tatt ut vannhastigheten som er beregnet 1 m over bunnen. Hastigheten er lagt inn på et bunnkotekart og presentert i vedlegg 1. Vedlegge 2 viser bunnkotene uten vannhastighet.

Det er viktig å være klar over at beregningsmodellen bruker et teoretisk hastighetsprofil for å finne hastigheten rett over bunnen. Hastigheten 1 m over bunnen er beregnet ved å ta utgangspunkt i hastigheten som er beregnet i de nærmeste cellene i beregningsgitteret, og å forutsette et logaritmisk hastighetsprofil ned mot bunnen.

I området nærmest utløpet er beregningsgitteret finmasket (0,625 m), slik at vi har resultat fra celler som ligger nær bunnen.

Lengre vekk fra utløpet er gitteret grovere, inntil 5*5*2,5 m. Her er hastigheten 1 m over bunnen mindre nøyaktig.

På kartene med bunnhastighet i vedlegg 1 kan man se brå hastighetsendringer som følger høydekotene. Det skyldes at geometrien i modellen får en trappetrinnsform knyttet til størrelsen på cellene i beregningsgitteret. Hastigheten er høyest på toppen av trinnet, og lavere rett på nedsiden av trinnet.

For å vurdere stabiliteten til bunnmateriale nær slike trinn anbefaler vi å bruke den høyeste hastigheten. Det gir litt høy hastighet og er antagelig litt på den sikre siden.

Hvis man ønsker detaljert hastighet mot bunnen for hele det modellerte, området må beregningene kjøres med et mer finmasket gitter.

4 Vurdering av resultatene

4.1 Strålens utbredelse

For strålens utbredelse i planet, illustrert ved f.eks. Figur 15, viser beregninger med ulike forutsetninger (ikke presentert her) at strålens retning varierer. I de fleste beregningene dreier strålen litt mot høyre i forhold til tunnelaksen, men i noen tilfeller dreier den litt mot venstre.

Selv om strålens retning varierer, så varierer hastigheten i lengderetningen mindre.

I virkeligheten vil strålen bli påvirket av vind, vinddrevet strøm, tidevannsstrøm og av vannet fra elven Opo. Disse forholdene er ikke med i beregningene.

Vi anbefaler derfor at man forutsetter at vannhastigheten i lengderetningen blir omtrent som beregnet (se også avsnitt 4.2), men antar at retningen på strålen kan variere mer enn det som fremgår av resultatene som er presentert i denne rapporten.

4.2 Saltvannets betydning

Når vannet fra tunnelen renner ut i det salte vannet i fjorden, så får det oppdrift fordi saltvannet er tyngre enn ferskvannet. Oppdriften fører til at strålen løftes mot overflaten, og spres mer i bredden enn i dybden.

Oppdriften kan redusere vannhastigheten nær bunnen. I beregningene har vi tilstrebet en tetthetsfordeling i fjorden som beskrevet i kapittel 2.3.3.

Tettheten er satt litt lavt i forhold til det som er målt (Figur 8). Normalt vil det være mer saltvann i fjorden enn vi har forutsatt, men i forbindelse med store flommer kan det komme mye ferskvann, f.eks. fra Opo.

I beregningene var det vanskelig å opprettholde riktig lagdeling (tetthet over dybden) pga. problem med grensebetingelsene mot fjorden (y_{maks}), som forklart tidligere. For å undersøke hvor følsomme resultatene er for lagdelingen har vi kjørt en beregning der alt vannet i fjorden hadde tetthet 1014 kg/m^3 . Det er en lav tetthet som tilsvarer det øverste vannlaget når det er mye ferskvann i fjorden, se Figur 8.

Vannføringen var $500 \text{ m}^3/\text{s}$ og beregningen var ellers lik beregningen som er presentert i kapittel 3.2. Figurene under viser de viktigste resultatene.

Figur 54 viser at strømmingen og strålens utbredelse i planet er ganske lik det vi beregnet i kapittel 3.2.

Figur 55 viser at vannhastigheten i strålens senterline også er ganske lik det vi beregnet i kapittel 3.2, men at vannhastigheten i overflaten holder seg noe lengre utover i fjorden når tettheten er 1014 kg/m^3 .

Ut fra dette mener vi at resultatene for vannhastigheten i strålens retning, for $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (kapittel 3.2), er lite følsom for usikkerhet knyttet til fjordvannets tetthet.

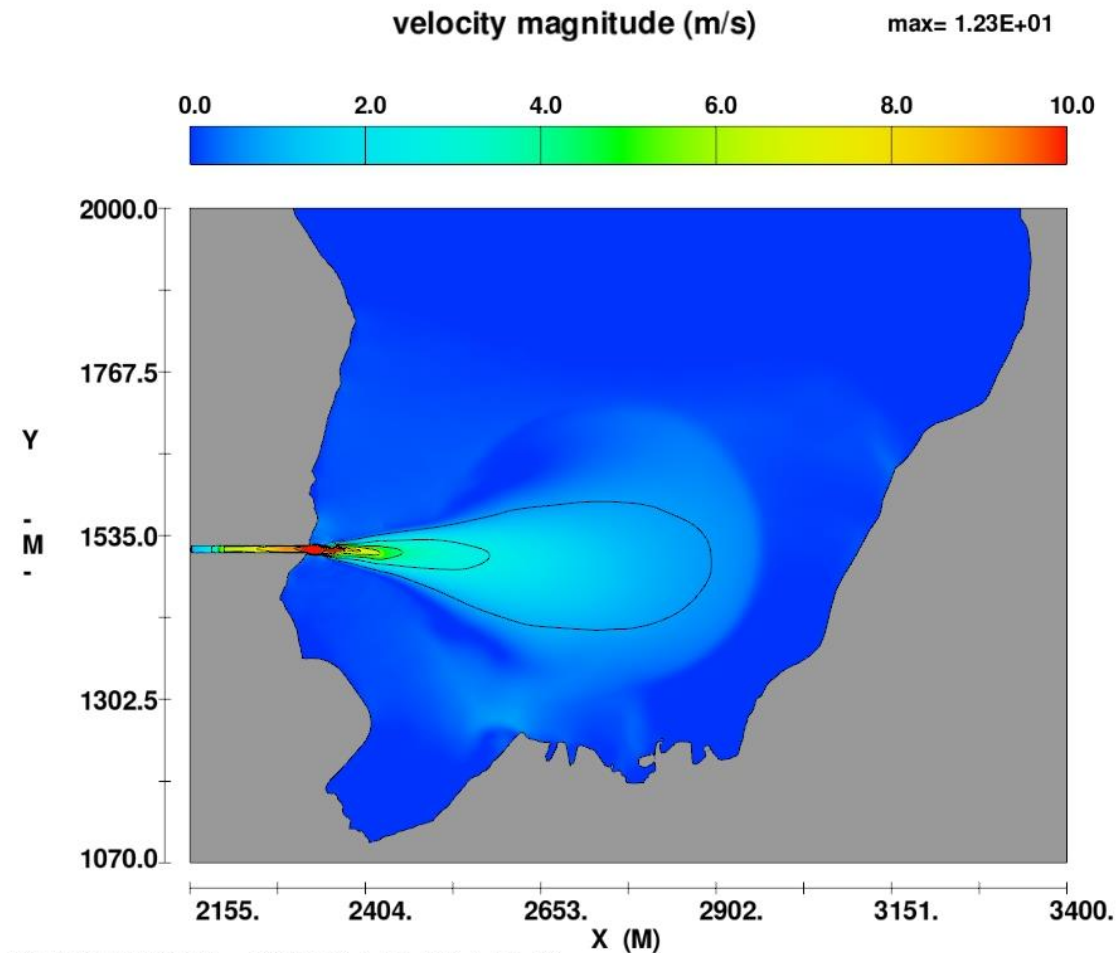
For normal vannføring ($75 \text{ m}^3/\text{s}$ og $37,5 \text{ m}^3/\text{s}$) ser det ut til at vi får en oppbremsing av strålen slik at den får en flat front, se f.eks. Figur 26 og Figur 38. Det er vanskelig å vite om dette er reelt, eller skyldes svakheter ved beregningene.

Vi ser at saltinnholdet i overflaten foran strålen øker når vi kjører beregningene i lang tid. Opphoping av saltet vann foran fronten av strålen gir et mottrykk som bremser strålen, slik at den blir kortere og bredere.

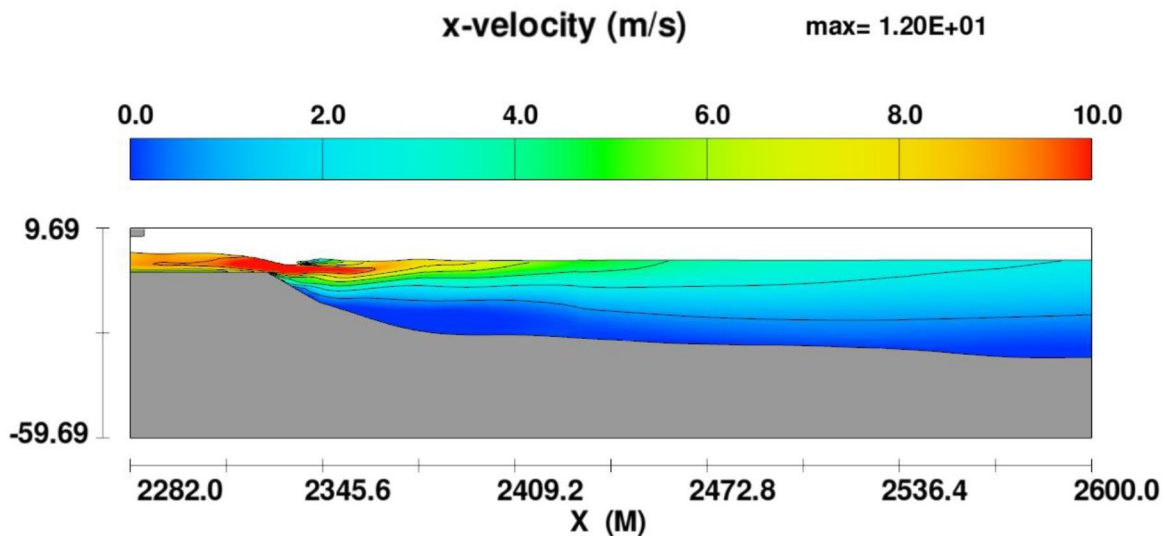
Dette kan skyldes at gitteret vi bruker har for store celler i forhold til tykkelsen på ferskvannslaget. For små vannføringer blir ferskvannslaget tynt i forhold til cellestrørrelsen, og det kan føre til at vi får for høyt saltinnhold nær overflaten. Det får særlig betydning langt fra munningen der ferskvannslaget er tynt og vannhastigheten er lav.

Resultatene for 75 m³/s og særlig for 37,5 m³/s, langt fra utløpet, bør derfor brukes med forsiktighet. Et tynt ferskvannslag som flyter i overflaten kan nå lengre ut enn det beregningene viser.

Samtidig viser sattelittbilder av elveutløp at strålen ofte har en flattrøkt front, omtrent som beregningene viser.



Figur 54 Q = 500 m³/s, vannhastigheten (m/s) på ca. 2 m dyp, utløp i vann med tetthet 1014 kg/m³



Figur 55 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, vannhastigheten (m/s) i tunnelens senterlinje, utløp i vann med tetthet 1014 kg/m^3

4.3 Bunntopografien ved utløpet

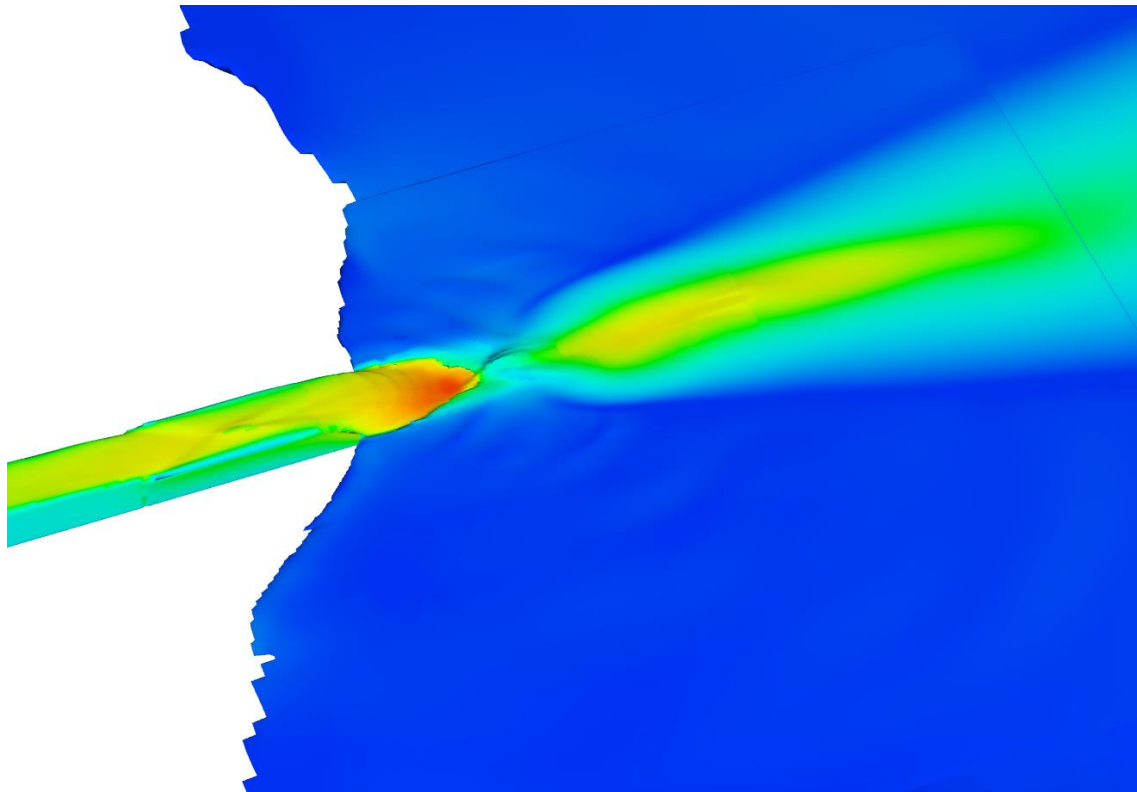
Som beskrevet i kapittel 2.2.2 var det misforhold mellom kartet med bunnkoter og oppmålingene på land, nær strandlinjen. Vi mener det skyldes at bunnen ikke var målt opp nær land.

Topografien ca. 100 m til hver side for tunnelåpningen ble derfor beregnet ved å interpolere mellom kote - 15 moh. og kote + 1 moh.

Dette betyr at bunnivået rundt tunnelutløpet er usikkert, noe som påvirker hastighetene vi har beregnet. Vi mener dette først og fremst påvirker hastigheten under strålen nær utløpet. Hvis bunnen ligger dypere enn vi har forutsatt, vil vannhastighetene nær bunnen være lavere enn beregnet, og omvendt.

4.4 Bølger ved utløpet

Bølgehøyder har ikke vært etterspurt for denne beregningen, så vi har ikke sett spesielt på det. Vi gjør likevel oppmerksom på at det ved $500 \text{ m}^3/\text{s}$ dannes store bølger ved utløpet. Figur 56 viser at det dannes et druknet vannstands sprang ved utløpet. Høydeforskjellen mellom vannspeilet rett oppstrøms spranget og bølgetoppen rett nedstrøms blir ca. 2,5 til 3 m.

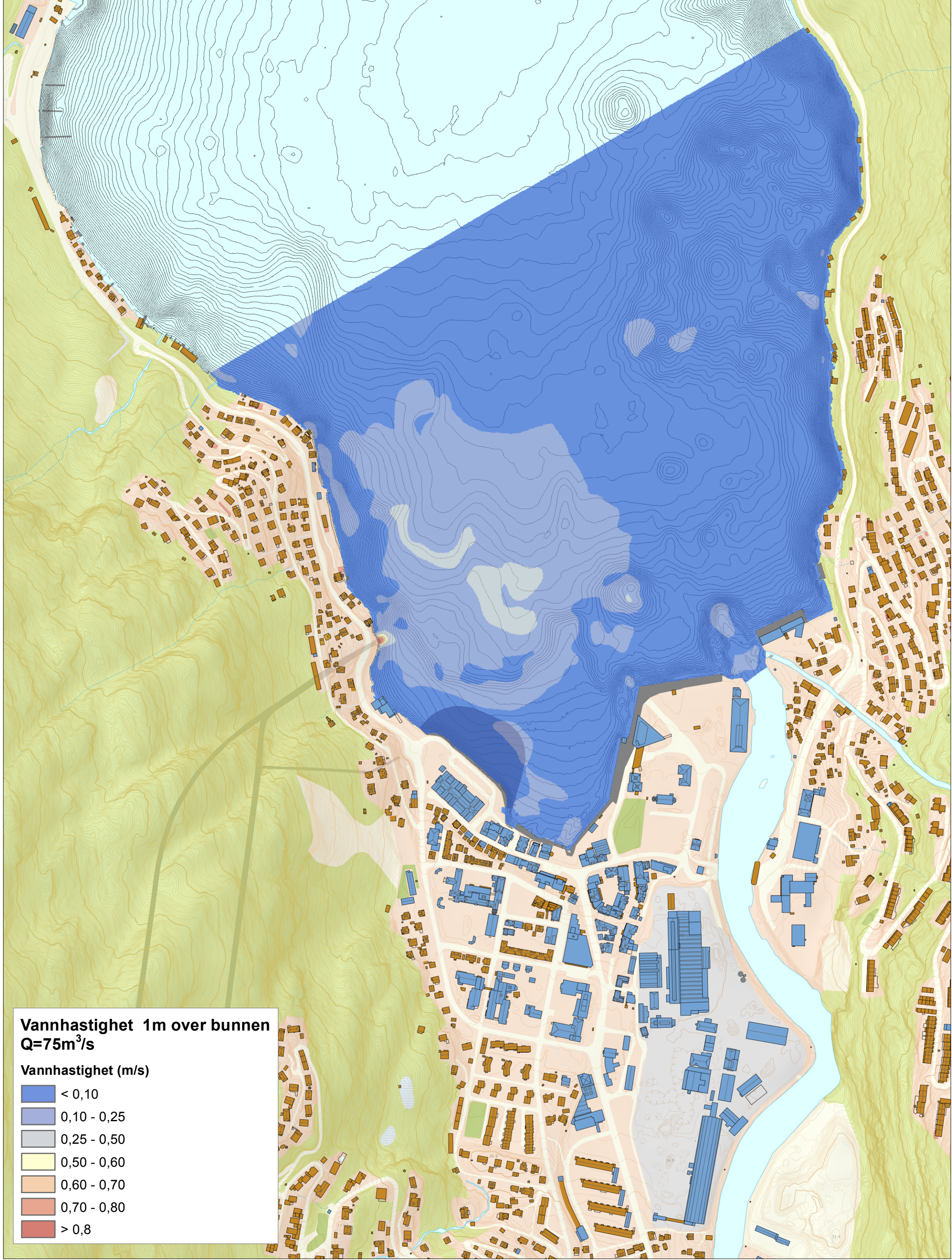


Figur 56 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, 3D fremstilling av strømmingen ved utløpet. Fargene viser vannhastighet.

5 Vedlegg








Liste over vedlegg:

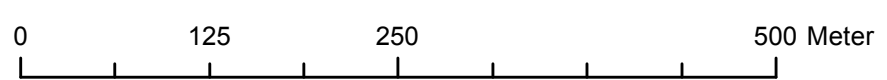
1. Vannhastigheter 1 m over bunnen
2. Bunnkotecart for Sørfjorden

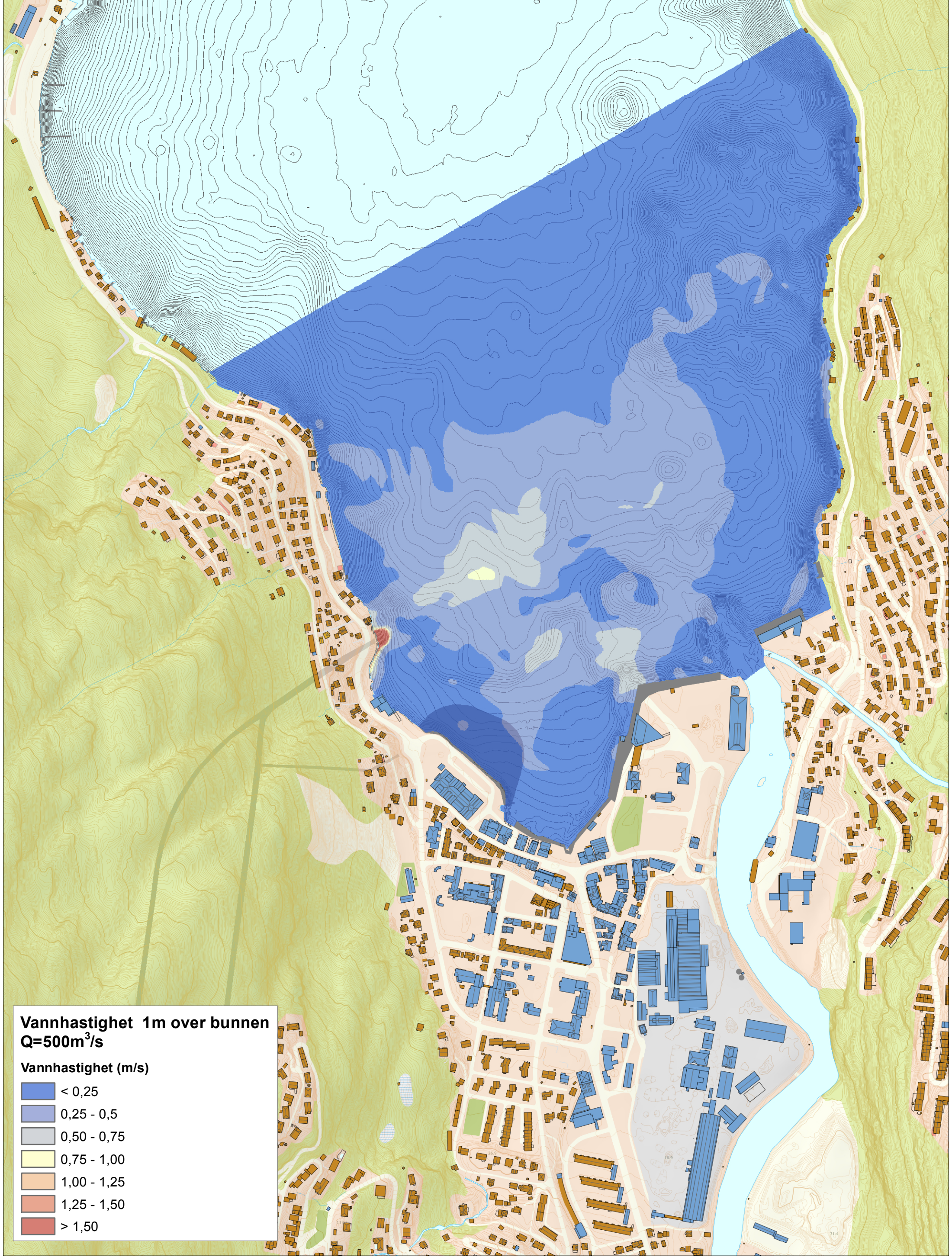


Vannhastighet 1m over bunnen
Q=75m³/s

Vannhastighet (m/s)








	< 0,10
	0,10 - 0,25
	0,25 - 0,50
	0,50 - 0,60
	0,60 - 0,70
	0,70 - 0,80
	> 0,8

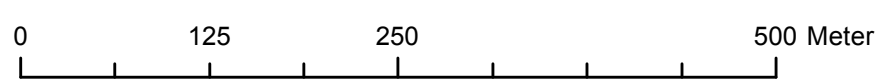




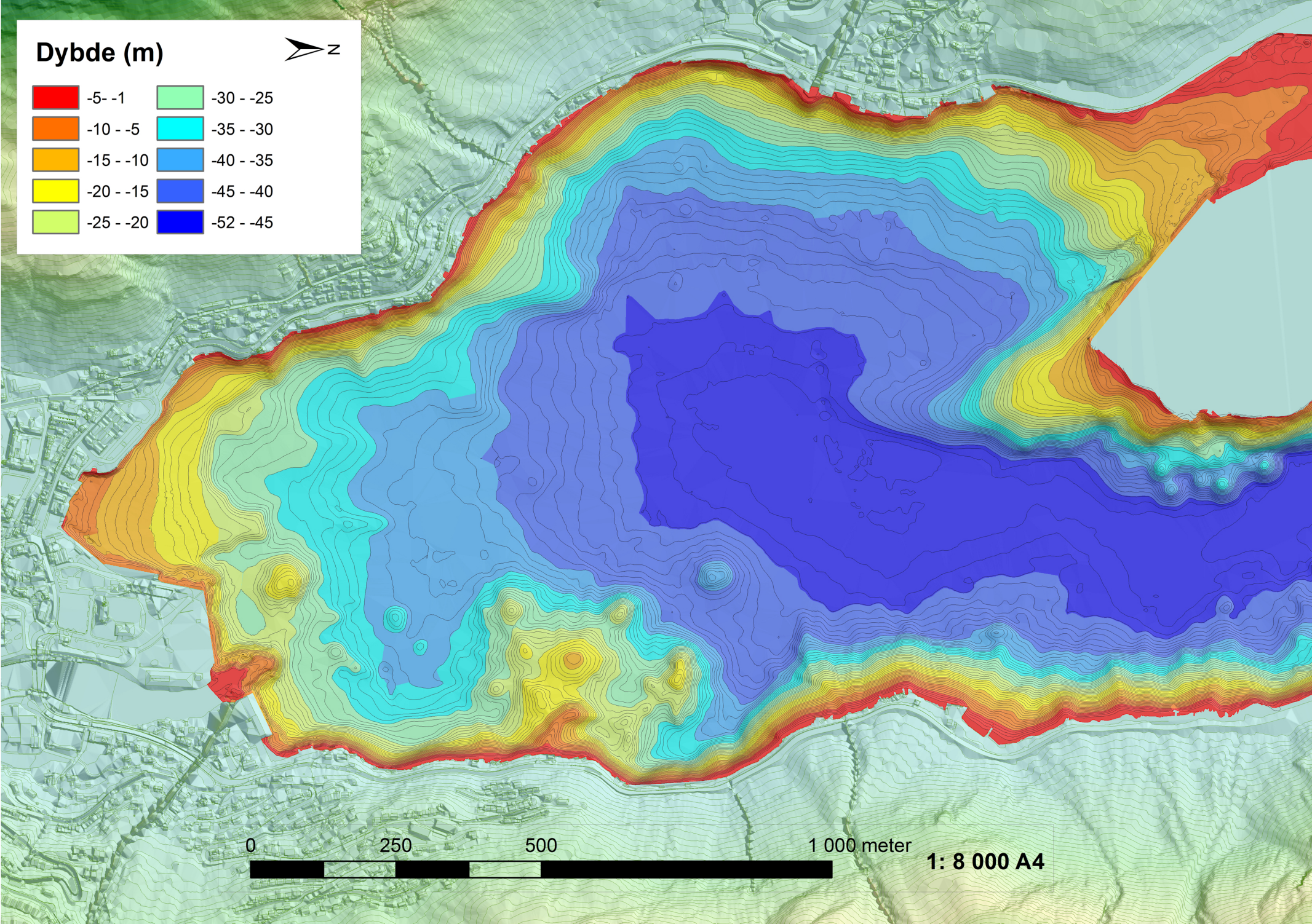
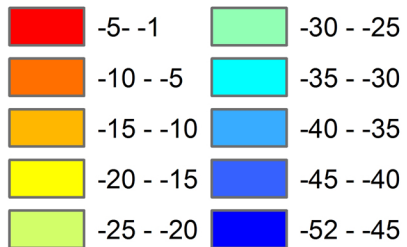
Vannhastighet 1m over bunnen
Q=500m³/s

Vannhastighet (m/s)

	< 0,25
	0,25 - 0,5
	0,50 - 0,75
	0,75 - 1,00
	1,00 - 1,25
	1,25 - 1,50
	> 1,50



Dybde (m)



0 250 500 1 000 meter

1: 8 000 A4