



KYSTVERKET

Stad Skipstunnel

Teknisk forprosjekt

VEDLEGG G - CFD-beregning av røykspredning



Oppdragsnr.: 5161743 Dokumentnr.: 001-A Versjon: J01
2016-11-08

J01	2016-11-08	For bruk	Anders Welde Vikan	Bård Venås	SA
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

CFD-simuleringer er gjennomført av brannforløp i et hurtigruteskip som har stoppet inne i tunnelen. Simuleringene vurderer forskjellige trekk-/ventilasjonsforhold som kan oppstå. De fleste simuleringene tar utgangspunkt i en 100 MW brann med en rask brannveksttid på 30 sekunder. Dette vil da ta for seg hendelsesforløpet etter at «brannrommet» er overtent og flammene slår ut på utsiden av skipet.

Beregningene viser at svært forskjellig røykutbredelse kan oppstå avhengig av de meteorologiske forholdene på utsiden og i selve tunnelen. Typisk dreier det seg om et vindu på 10-12 minutter etter røykspredning fra fullt utviklet brann starter der rømningsforholdene er akseptable. Målinger av de meteorologiske forholdene viser at de kan variere svært mye og også endre seg under et typisk brannforløp med varighet på noen timer (se Vedlegg H: Ventilasjon). Det vil derfor ikke være mulig å ha kontroll på røyken under en slik dimensjonerende brannhendelse i tunnelen uten aktive ventilasjonstiltak. Om det er behov for aktiv ventilasjon diskuteres i Vedlegg F: Risikoanalyse.

Innhold

1	Innledning	5
2	Modell	6
2.1	Metode	6
2.2	Geometri og beregningsgrid	6
2.3	Rand- og initialbetingelser	8
2.4	Brann	9
2.5	Termiske egenskaper fjell	9
2.6	Sikt	10
3	Resultater	11
3.1	Scenario 1 (Brannstørrelse: 100 MW, Trykkdifferanse portaler = 20 Pa)	12
3.2	Scenario 2 (Brannstørrelse: 100 MW, Trykkdifferanse portaler = 30 Pa)	14
3.3	Scenario 3 (Brannstørrelse: 100 MW, Trykkdifferanse portaler = 0 Pa)	16
3.4	Scenario 4 (Brannstørrelse: 25 MW, Trykkdifferanse portaler = 0 Pa)	18
4	Diskusjon	20
5	Konklusjon	22
6	Referanser	23

1 Innledning

I forbindelse med utredningen av Stad skipstunnel har Norconsult vurdert røykspredning ved en brannhendelse i et skip som hurtigruten inne i tunnelen.

Denne rapporten går gjennom de forskjellige simulerte scenariene for brannhendelser. Hensikten med beregningene er å danne seg et bilde av røykspredningen ved forskjellige meteorologiske scenarier, både ved stillestående luft og ved trekk i tunnelen. Simuleringene danner et grunnlag for den videre vurderingen av rømningsforhold i tunnelen.

2 Modell

2.1 Metode

Forkortelsen CFD kommer fra engelsk: Computational Fluid Dynamics - og beskriver en generell form for datasimulering hvor de grunnleggende fysiske likningene for strømninger i gasser og væsker, dvs. fluidodynamikk, løses ved bruk av datakraft (derav "computational"). I grove trekk beskriver modellen hvordan varme tilføres gass ved forbrenning og overføres videre til fjell ved stråling og konveksjon fra gassen gjennom matematiske modeller. Anvendelsen innenfor brann i dette arbeidet er en av mange anvendelsesområder for metodikken.

CFD-simuleringer utføres for en 3D-modell av geometrien. Ut fra geometrien settes det opp en volummodell for luften i området samt fjell, som deles opp i et stort antall beregningsceller (beregningsgrid). Dette for at datamaskinen må løse likningene ved å evaluere de ulike størrelsene i celler. Programvaren har også effektive verktøy for visualisering, og det er mulig å analysere dataene grundig og presentere de på illustrative måter.

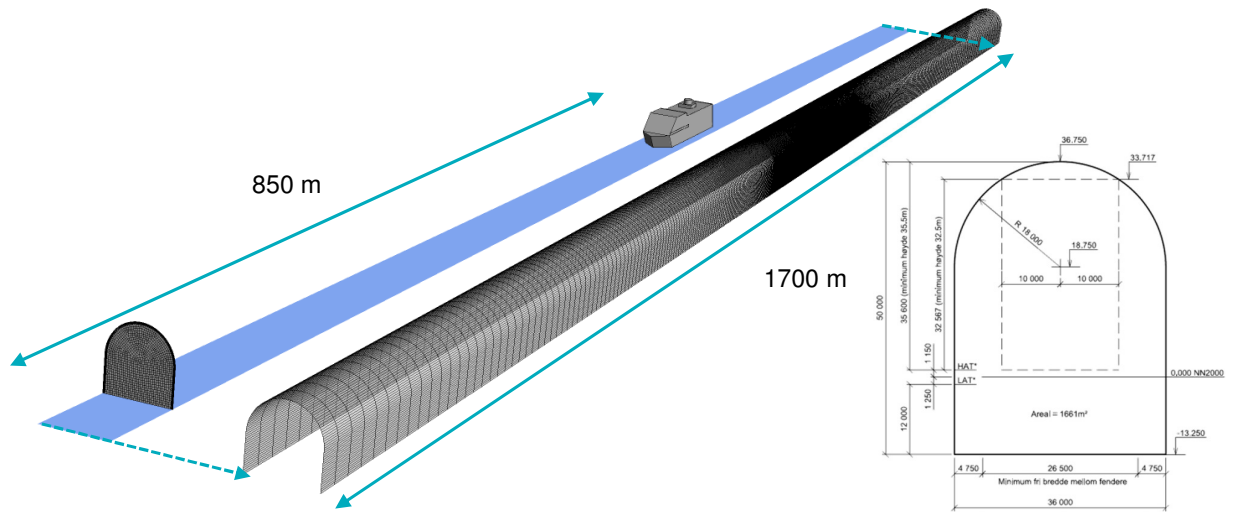
I praktiske beregninger er det nødvendig å modellere (lage tilnærmede likninger) for flere deler av fysikken pga. de begrensninger som finnes i datakapasitet. I dette arbeidet er de viktigste faktorene som modelleres turbulensen i strømmingen og forbrenningen, to forhold som er tett knyttet sammen. Det er benyttet en to-ligningsmodell, SST-k- ω som turbulensmodell, mens forbrenningen modelleres ved en Eddy Break-up Model (EBM) [1]. For å modellere strålingen er Monte Carlo – modellen benyttet [1].

CFD-programvaren som er benyttet er ANSYS CFX 17.0, siste versjon av et verdensledende produkt fra en av verdens største leverandører av slik programvare (<http://www.ansys.com/>).

2.2 Geometri og beregningsgrid

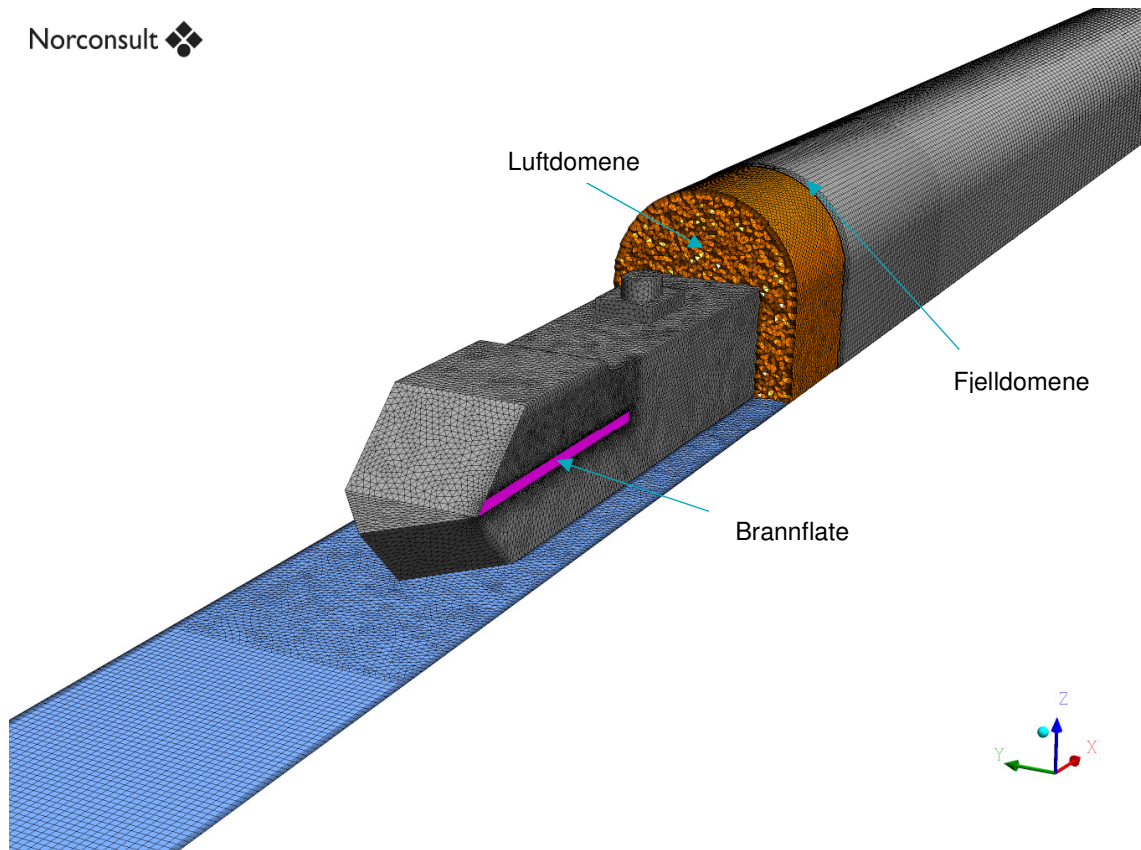
Tverrsnittet av tunnelen i modellen er tilsvarende det prosjekterte tverrsnittet som befinner seg over havnivå. Dette tverrsnittet er på ca. 1200 m², 36 m bredt og ca. 37 m fra havoverflata til toppen av hengen.

Figur 1 og figur 2 viser hhv. 3D-modellen sammen med beregningsgriddet. Modellen omfatter luftdomenet med et 20 cm tynt sjikt med fjell rundt. Fjellsjiktet er tykt nok til å modellere den varmen som går til fjell i løpet av den simulerte tiden i dette prosjektet. Hurtigruten er plassert midt i tunnelen, både i tverrsnittet og longitudinalt.



Figur 1: Geometrisk modell av beregningsdomenet. Tegning av tverrsnitt klippet inn til høyre.

Norconsult



Figur 2: Visualisering av beregningsgrid i området rundt båten.

2.3 Rand- og initialbetingelser

I grensen mellom modellen og «resten av verden» må forholdene beskrives for modellen. Dette kalles modellens randbetingelser. I tillegg må man beskrive initialbetingelsene, altså systemets tilstand ved simuleringstart. De viktigste betingelsene er gjengitt i tabell 1 og tabell 2.

Tabell 1: Oppsummering av de vesentligste randbetingelsene i simuleringen.

Flate	Randbetingelse relatert til impuls	Randbetingelse relatert til termisk energi
Innløp	0 Pa eller gitt hastighet (avh. av scenario)	6,9 °C eller 15 °C (avh. av scenario)
Utløp	0 Pa	6,9 °C eller 15 °C (avh. av scenario)
Vannoverflate	Ru vegg (ruhetshøyde: 0,17 m) ¹	6,9 °C
Hurtigruten	Glatt vegg	6,9 °C

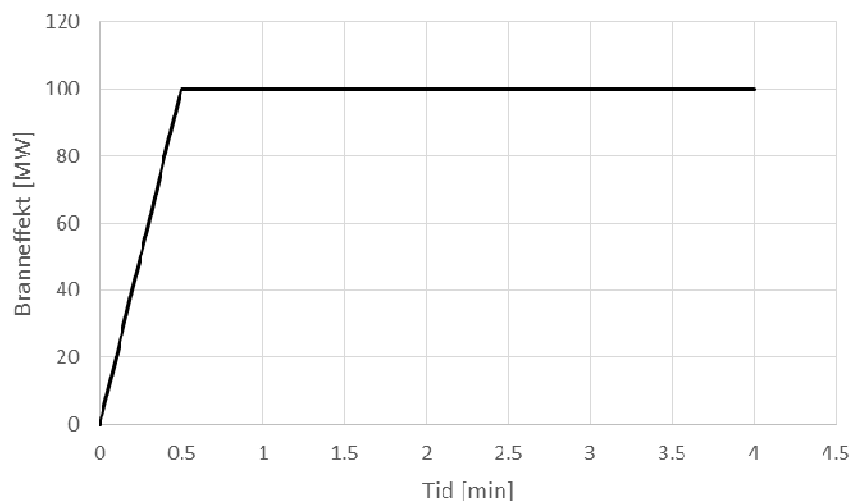
Tabell 2: Initialbetingelser i simuleringen.

Domene	Initialbetingelse relatert til impuls	Initialbetingelse relatert til termisk energi
Fjell	Ikke relevant	6,9 °C
Luft	0 Pa, hastighet avhengig av scenario	6,9 °C eller 15 °C (avh. av scenario)

¹ Tilsvarer darcys friksjonsfaktor på ca. 0,03

2.4 Brann

Den undersøkte brannen i prosjektet er satt til en branneffekt på 100 MW [2]. Brannen i CFD-simuleringen når maks effekt etter et halvt minutt. Tid 0 minutter vil her bety i det «brannrommet» overtenner og det understrekes at det kan ta betydelig tid før dette inntreffer.



Figur 3: Brannkurve.

2.5 Termiske egenskaper fjell

De termiske egenskapene til fjellet er satt som vist i tabell 3:

Tabell 3: Termiske egenskaper fjell.

Egenskap	Verdi
Massetetthet	2600 kg/m ³
Varmekapasitet	800 J/kgK
Termisk konduktivitet	2,79 W/mK

2.6 Sikt

Sikten blir redusert nesten utelukkende av sotinnholdet i forbrenningsproduktene. I disse simuleringene er andelen av sot i brenselet antatt å være 10 % (masseprosent). Dette gjenspeiler en forbrenning med høy sotproduksjon. Sikten i meter blir regnet ut fra følgende uttrykk [3]:

$$Sikt [m] = \frac{1 \left[\frac{g}{m^2} \right]}{X_{sot}}$$

X_{sot} : massekonsentrasjon av sot [kg/m^3]

Formelen uttrykker maks-avstanden et belyst skilt kan oppdages visuelt og identifiseres.

3 Resultater

Beregningsresultatene viser situasjonen ved ulike tidspunkt etter brannstart for de ulike scenariene. Plottene viser sikten i et plan 5 m over vannoverflaten i rømningshøyde og et vertikalt snitt midt gjennom tunnelen. Det er i dette kapitlet valgt å fokusere på sikt og strålingsintensitet som gir indikasjoner på rømningsforholdene i tunnelen.

Tabell 4 viser en oversikt over de simulerte brannscenariene. I alle scenarier med trekk er trekkretning i retning baug mot akter.

Tabell 4: Oversikt over simulerte scenarier

Scenario nr.	Brannstørrelse [MW]	Trykkforskjell mellom portaler [Pa]	Trekk i tunnelen ved brannstart [m/s]	Starttemperatur fjell [°C]	Lufttemperatur [°C]
1	100	20	3,5	6,9	6,9
2	100	30	4,3	6,9	6,9
3	100	0	0	6,9	15
4	25	0	0	6,9	15

3.1 Scenario 1 (Brannstørrelse: 100 MW, Trykkdifferanse portaler = 20 Pa)

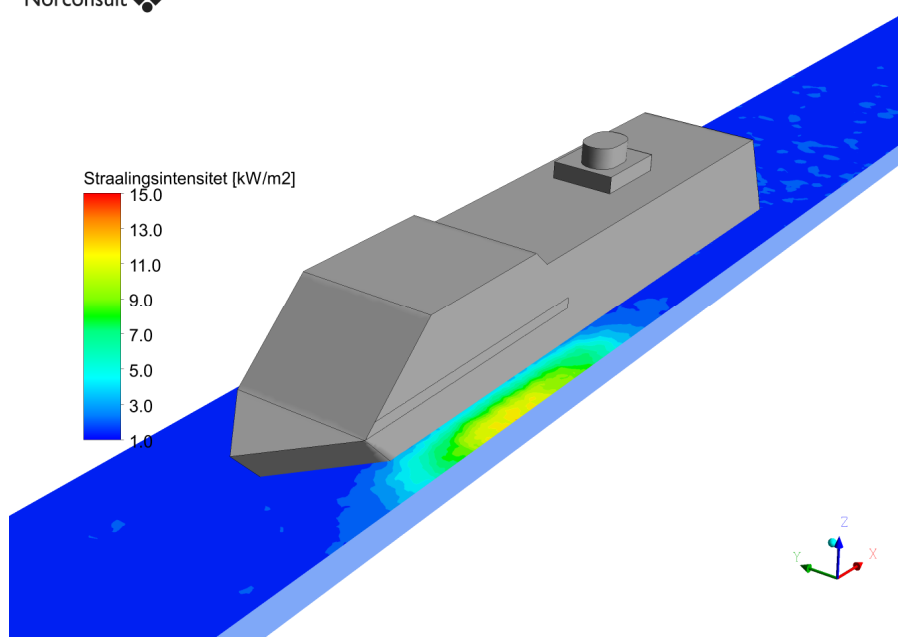
Dette brannscenarioet er simulert med værforhold utenfor tunnelen som opprettholder et overtrykk på den ene portalen på 20 Pa. Overtrykket induserer en trekkhastighet på ca. 3,5 m/s før brannstart.

Figur 5 viser en bildeserie av utbredelsen av røyken under brannscenarioet vist ved sikt lengden. Brannens utvikling vil etter hvert medføre større motstand for luften som går gjennom tunnelen. Dette resulterer i at hastigheten oppstrøms brannen etter hvert reduseres under den kritiske hastigheten. Dette fører til at en tilbakesjiktning² brer seg motstrøms i tunnelen etter 10-13 minutter. Dette ses tydelig i øyeblikksbildet etter 13 minutter i figur 5. Dette betyr at en trykkforskjell på 20 Pa over portalene er for lite til å fortrenge brannrøyken.

Rett nedstrøms skipet ligger en bakevje med lavt trykk. Denne suger til seg røyk og rører røyken rundt i tverrsnittet. Denne effekten skaper dårlig sikt nedstrøms skipet og noen områder ligger lavere enn 10 m sikt etter 10 minutter.

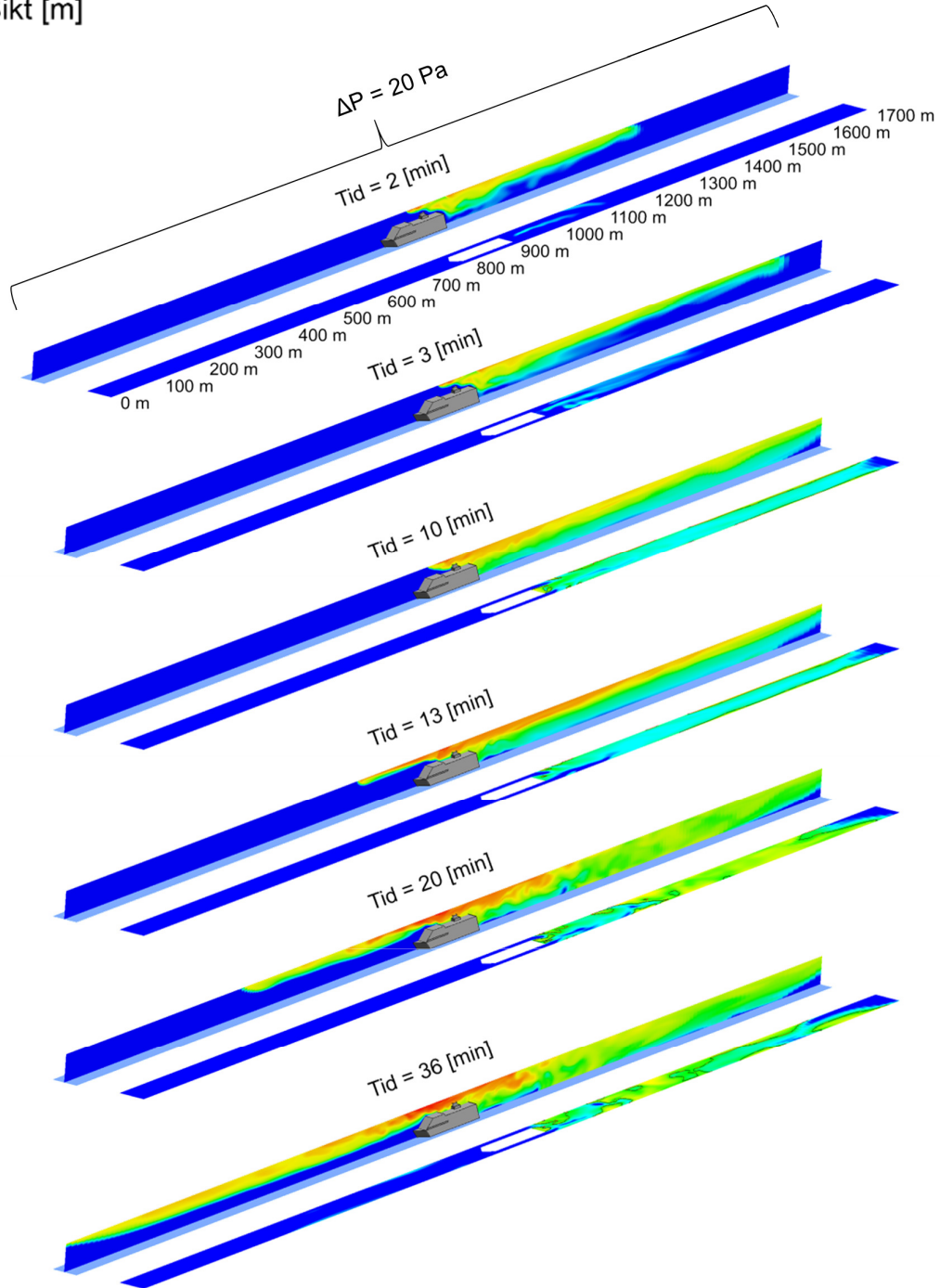
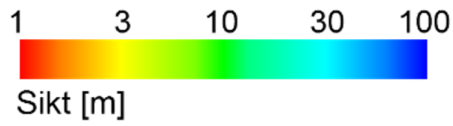
Strålingsintensiteten fra brannen ligger nært oppunder 10 kW/m² på kote 5 m nært brannstedet.

Norconsult



Figur 4: Strålingsintensitet 5 m over vannoverflaten.

² Varmt røyklag oppunder hengt i tunnelen som brer seg motstrøms luftretning



Figur 5: Tidsserie av røykspredningen visualisert som sikt lengde. Grønt viser 10 meters sikt. 100 MW, 20 Pa vindindusert trykkforskjell over portaler.

3.2 Scenario 2 (Brannstørrelse: 100 MW, Trykkdifferanse portaler = 30 Pa)

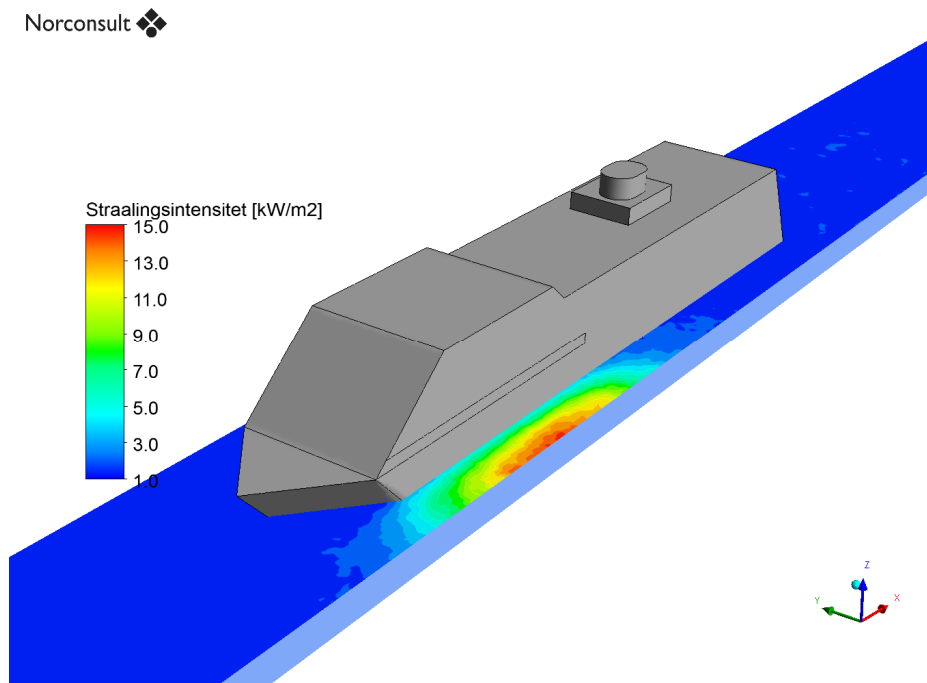
Brannscenarioet skjer ved et trykkdifferanse mellom portalene på 30 Pa, noe som setter opp en initial hastighet i tunnelen på ca. 4,3 m/s før brannstart.

Figur 7 viser en bildeserie av den følgende røykspredningen visualisert ved siktlegden. Simuleringen viser at et trykk på 30 Pa er nok til å opprettholde røykfortrengning mot én side ved en 100 MW brann. Bildeserien viser også bedre siktforhold sammenlignet med scenario 1 som hadde 20 Pa trykkdifferanse.

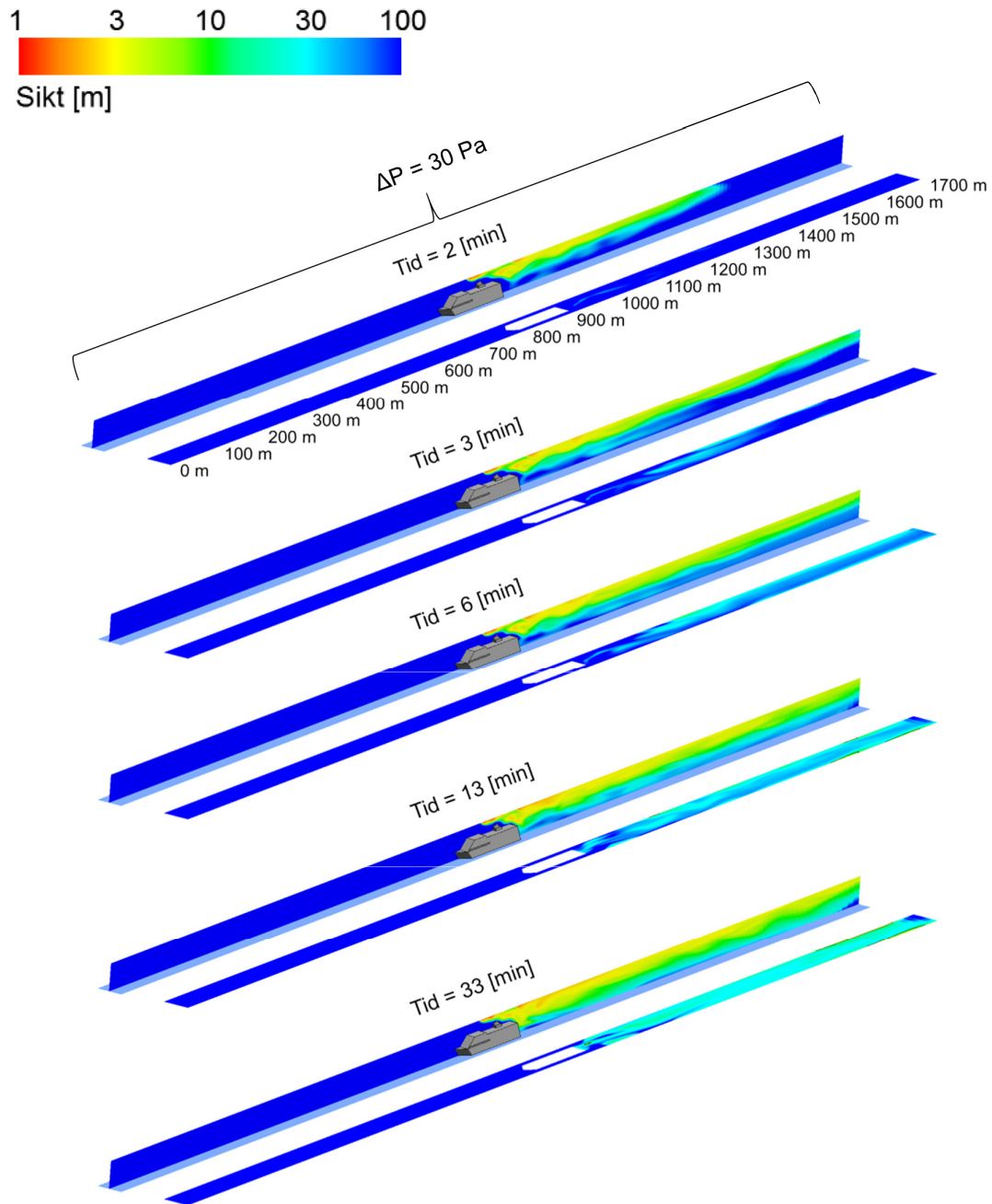
Siktforholdene nedstrøms skipet er også bedre sammenlignet med scenario 1. Sikten ligger generelt over 10 meter, noe som skyldes en bedre sjiktning av røyk nedstrøms skipet. Den dårligere sjiktningen i scenario 1 ser ut til og skyldes fortrengningen forvoldt av tilbakesjiktningen, altså at varm røyk som strømmer motstrøms fortrenger motkommende luft til nedre del av tunneltverrsnittet. Dette skaper et hurtig strømmende kaldsjikt i den nedre delen som ved vekselvirkningen med skipet skaper en kraftigere bakevje og øker effekten av omrøring nedstrøms skipet.

Den forholdsvis gode sikten nedstrøms skipet for dette scenarioet skyldes at det opprettholdes en viss sjiktning i dette strekket. I tunneler med mindre tverrsnitt av type bil- og tog tunneler, er dette uvanlig. Der fylles mer eller mindre hele tverrsnittet med røyk. Graden av sjiktning synes å være avhengig av forholdet mellom tverrsnittsarealet og branneffekten, og tverrsnittet er i dette tilfellet stort nok til å legge til rette for sjiktning nedstrøms skipet.

Strålingsintensiteten ligger på ca. 15 kW/m² langs kote 5 m (figur 6).



Figur 6: Strålingsintensitet over vannoverflaten.



Figur 7: Tidsserie av røykspredningen visualisert som siktlengde. Grønt viser 10 meters sikt. 100 MW, 30 Pa trykkforskjell mellom portaler.

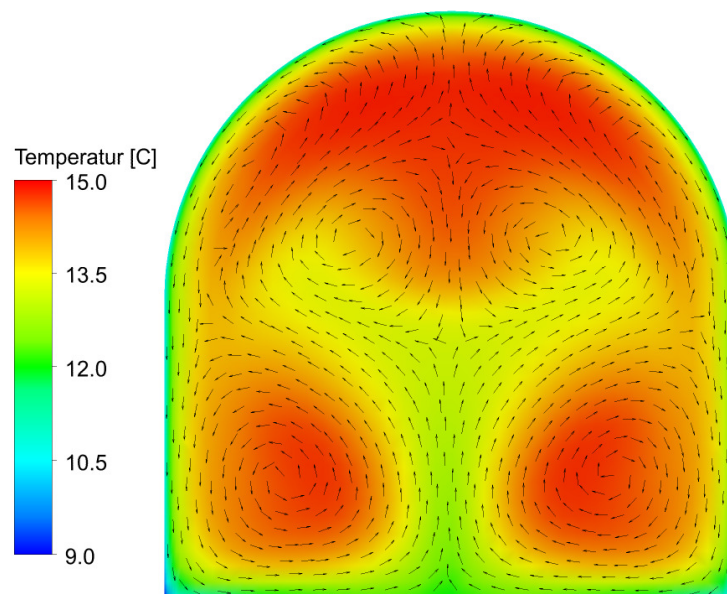
3.3 Scenario 3 (Brannstørrelse: 100 MW, Trykkdifferanse portaler = 0 Pa)

Denne simuleringen er utført uten noe trykkdifferanse på portaler. Imidlertid er startbetingelser for temperatur i fjell satt til 6,9 °C, mens lufttemperaturen er satt til 15 °C. Dette skaper et strømningsbilde i tverrsnittet som vist figur 8. Den varmere luften kjøles mot den kalde fjellveggen, blir tyngre enn omkringliggende luft og faller ned mot vannoverflaten langs fjellveggen. Midt i tverrsnittet flytter det seg luft oppover. Mekanismen gjør at etter hvert som varm røyk kjøles mot fjell og dermed mister sin oppdrift, så føres den ned mot vannoverflaten langs fjellveggen.

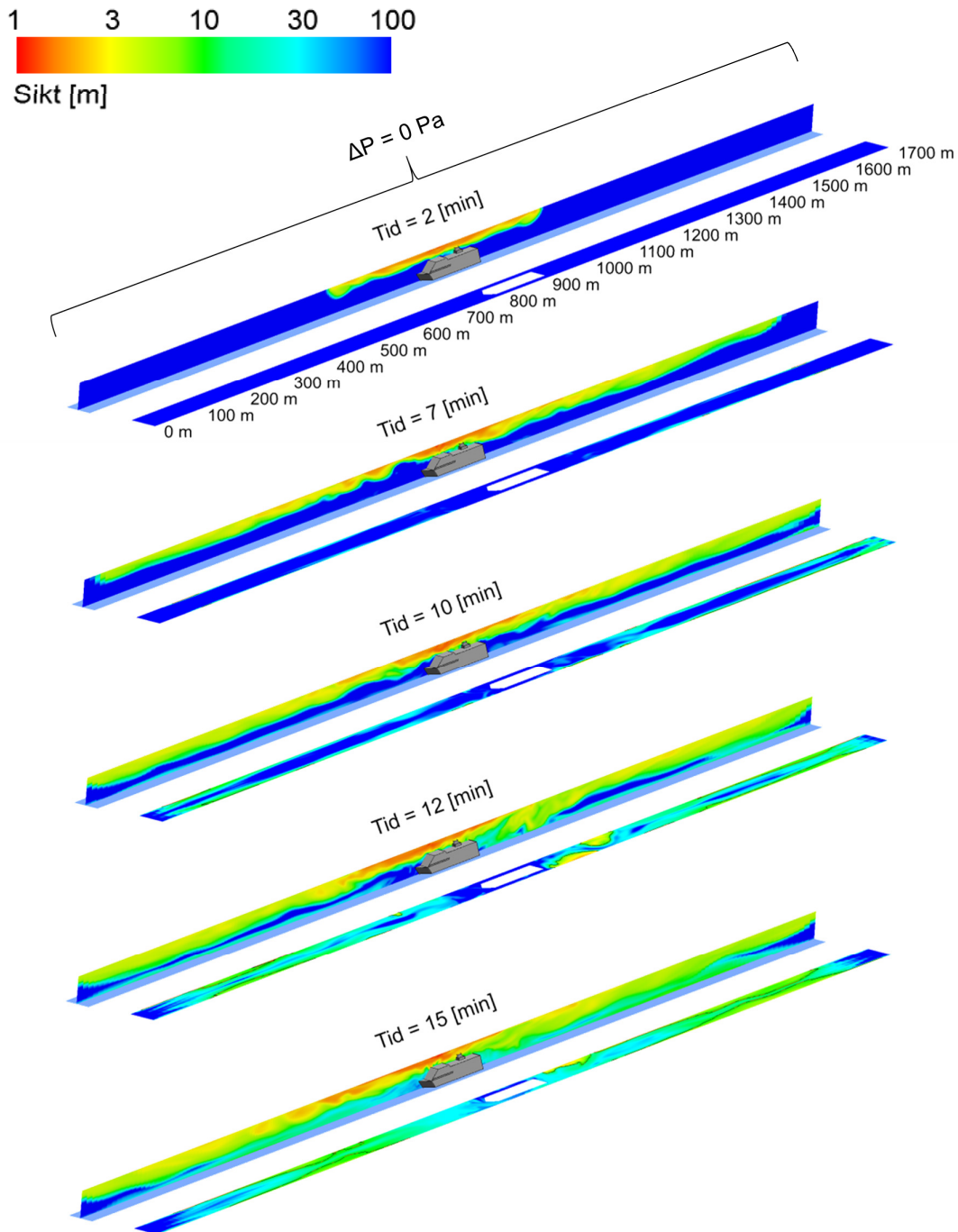
Dette vises også i tidsserien vist i figur 9 der røyk trekkes ned i tverrsnittet etter ca. 7-10 minutter og skaper store områder med siktlengde kortere enn 10 meter etter ca. 12-15 minutter.

Strålingsintensiteten er tilsvarende scenario 2.

Norconsult



Figur 8: Prinsipielt strømningsbilde i tverrsnittet.



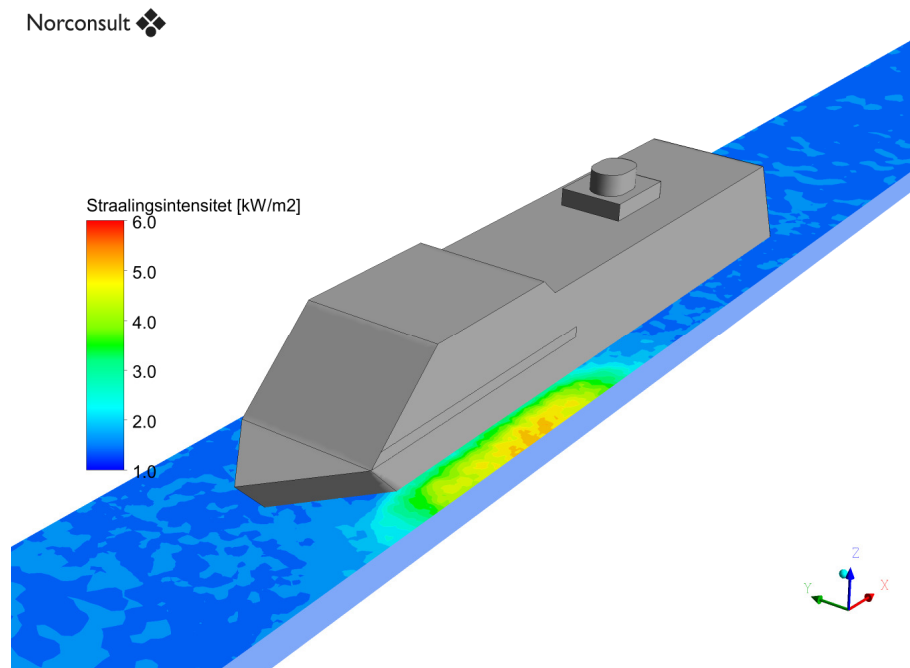
Figur 9: Tidsserie av røykspredningen visualisert som siktlengde. Grønt viser 10 meters sikt. 100 MW, ingen vindindusert trykkforskjell over portaler.

3.4 Scenario 4 (Brannstørrelse: 25 MW, Trykkdifferanse portaler = 0 Pa)

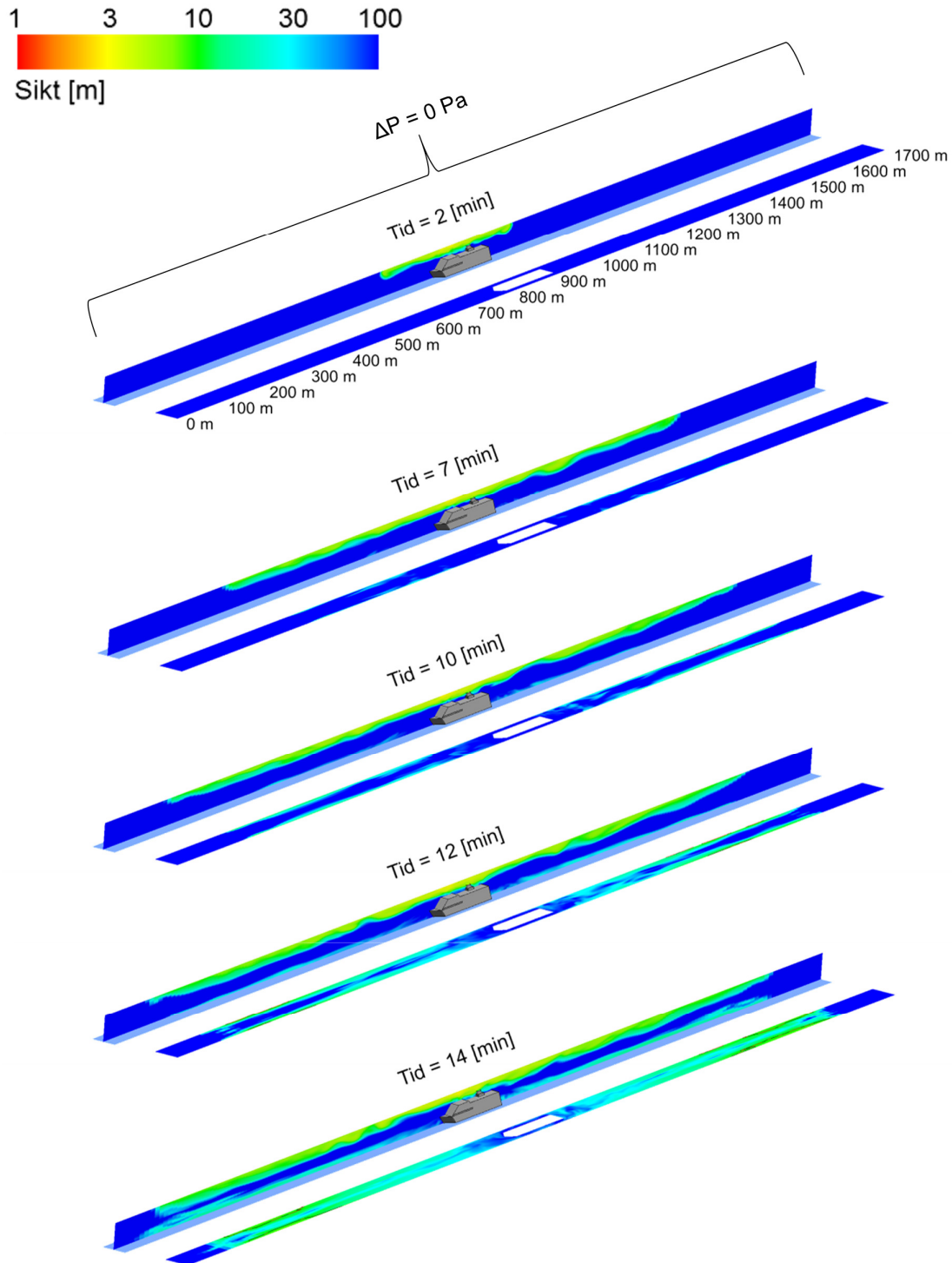
Denne simuleringen tar utgangspunkt i de samme forholdene som scenario 3, men med en lavere brannstørrelse på 25 MW. Motivasjonen bak simuleringen er at en mindre brann har mindre oppdrift og vil dermed potensielt medføre røyk som i større grad synker ned mot vannoverflaten.

Tidsserien i figur 11 oppsummerer denne simuleringen. Om denne sammenlignes med figur 9, ser man at siktforholdene derimot er bedre ved en 25 MW brann. Dette skyldes at strømningsbildet beskrevet i figur 8 er sterkt nok til å dra med seg røyken ned i tverrsnittet uavhengig av om brannstørrelsen er 25 MW eller 100 MW. En større brann skaper mer røyk og dermed verre rømningsforhold i dette tilfellet. Imidlertid vil det kunne være situasjoner gitt av temperaturdifferansen mellom lufta og fjellet som gjør at røyk fra en mindre brann synker ned, mens en større brann ikke gjør det.

Strålingsintensiteten ligger på ca. 5 kW/m² langs kote 5 m (figur 10).



Figur 10: Strålingsintensitet over vannoverflaten.



Figur 11: Tidsserie av røykspredningen visualisert som siktlengthe. Grønt viser 10 meters sikt. 25 MW, ingen vindindusert trykkforskjell over portaler.

4 Diskusjon

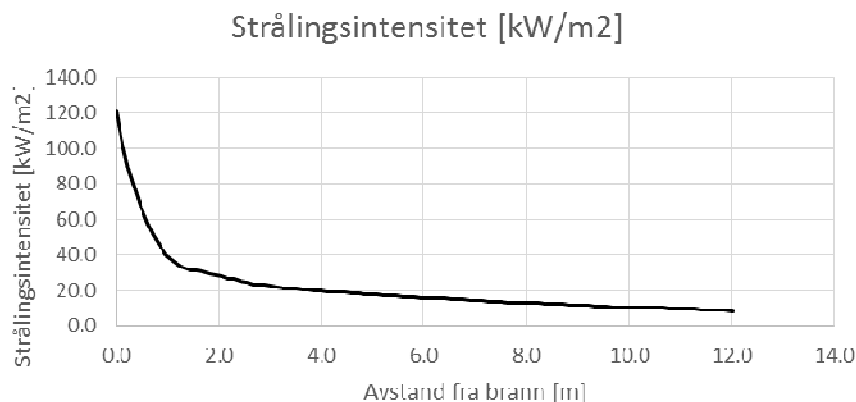
Resultatene fra CFD-beregningene viser hvordan røyken brer seg ut ved forhåndsdefinerte trekkscenarier: konstant 20 Pa trykkdifferanse mellom portaler, konstant 30 Pa trykkdifferanse mellom portaler, uten trykkrefter mellom portaler for 100 MW brann. I tillegg er en 25 MW brann uten trykkrefter mellom portaler undersøkt.

I simuleringene med trykkdifferanser ble det fastslått at det kreves 30 Pa eller mer for å fortrenge røyken én vei. Slike trekksituasjoner vil typisk gi gode rømningsforhold oppstrøms skipet og dårligere rømningsforhold nedstrøms skipet.

Har man en trekksituasjon med mindre trykk enn dette vil det typisk oppstå en situasjon med tilbakesjiktning i tunnelen, altså at røyk trenger seg oppunder hengen motstrøms den generelle trekkdiringen. Simuleringene viser også her gode rømningsforhold oppstrøms og dårlige rømningsforhold nedstrøms. Den turbulente bakevjen bak skipet vil røre røyken rundt i tverrsnittet og i stor grad ødelegge sjiktningen nedstrøms i tunnelen. I tillegg kan situasjoner der fjellet er kaldere enn utelufta destabilisere sjiktningen på samme måte som vist under scenario 3.

I situasjoner med tilnærmet ingen trykkforskjell mellom portalene viser beregningene at det ikke nødvendigvis vil opprettholdes en stabil røyksjiktning i tunnelen. Disse beregningene er basert på noe kaldere fjell enn lufttemperatur, som vil destabilisere røyksjiktet i større grad enn om man har tilnærmet samme temperatur på luft og fjell, eller varmere fjell enn luft. Dette aspektet vil variere avhengig av hvordan meteorologien har variert rundt branntidspunktet.

Strålingsintensitet fra brannen er relativt likt for alle brannene på 100 MW og ligger oppunder 15 kW/m² langs siden av skipet i rømningshøyde 5 m over havnivå. Dette vil imidlertid være avhengig av hvor brannen oppstår på skipet, dvs. om brannen ligger nærmere vannoverflaten øker strålingsintensiteten her. Derfor er det tatt ut strålingsintensitet langsmed en linje fra brannsted til vannoverflaten for en nyansering av dette bildet med hensyn til andre brannplasseringer (figur 12).

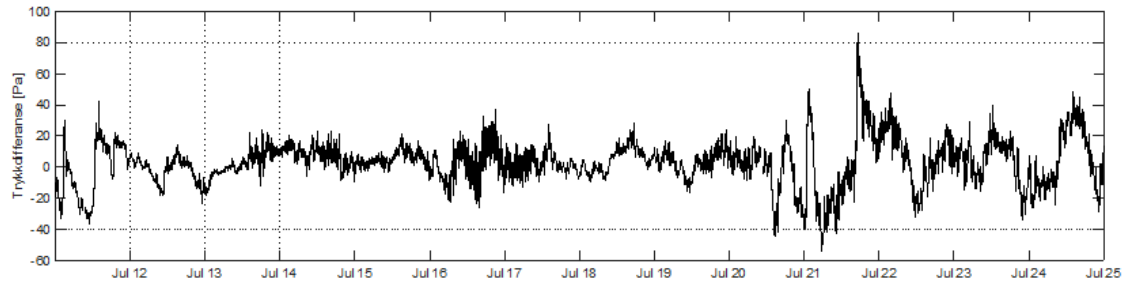


Figur 12: Strålingsintensitet som funksjon av avstand fra brannen.

Vind- og trykkforhold på utside av tunnelen er ikke statiske og under en brannhendelse er det derfor grunn til å tro at ingen av de enkelte simulerte scenariene vil inntreffe, men heller en dynamisk kombinasjon av disse. Dette underbygges av trykkmålinger gjennomført ved portalene på Stad (figur 13) [4]. Tidsserien viser trykkforskjell mellom portalene. Denne viser at trykkforskjellen varierer mellom

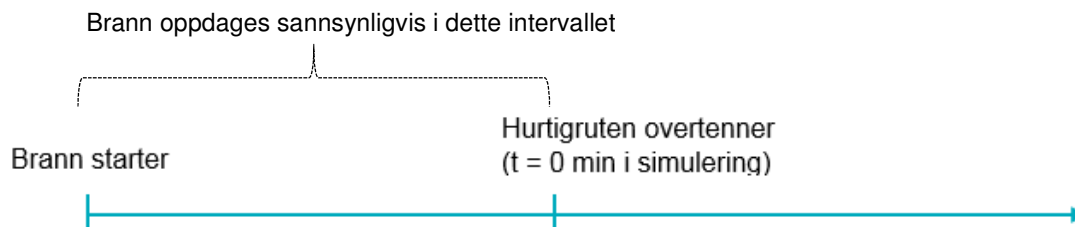
+80 Pa og -50 Pa i denne perioden og varier en del fra time til time. Derfor er det vanskelig å ha kontroll på røyktubredelsen uten aktive ventilasjonstiltak i tunnelen.

Det vises for øvrig til «Vedlegg F: Risikoanalyse» og «Vedlegg H: Ventilasjon» for nærmere diskusjon av trekkforhold i tunnelen og diskusjon rundt behov for aktive ventilasjonstiltak.



Figur 13: Måledataserie av trykkdifferanse mellom portaler i Pascal [N/m²].

Midlertid tyder alle simulerte scenarier på at det er et tidsvindu på ca. 10-12 minutter med siktforshold over 10 meter. Med denne tiden menes den tiden som er tilgjengelig etter at brannen er overten³ som illustrert i figur 14. Det vil i tillegg være tilgjengelig rømningstid mellom at brannen oppdages og at brannen eskalerer til overtenning, gitt at den oppdages i intervallet mellom brannstart og overtenning.



Figur 14: Tidslinje som viser tidsforløp ved et branntilfelle.

³ Med overtenning menes at flammene slår ut av hurtigruten og kraftig røykspredning til tunnel starter

5 Konklusjon

Det er kjørt CFD-beregninger av brannforløp for forskjellige trekkscenarier: konstant 20 Pa trykkdifferanse mellom portaler, konstant 30 Pa trykkdifferanse mellom portaler, uten trykkdifferanse mellom portaler for 100 MW brann. I tillegg er en 25 MW brann uten trykkdifferanse mellom portaler undersøkt.

Beregningene viser at det vil være nødvendig med ca. 30 Pa trykkforskjell mellom portalene for å fortrenge røyken. Dette tilsvarer en trekkhastighet i tunnelen på ca. 4,3 m/s uten påvirkning fra brannen. Rømningsforholdene vil da være svært gode oppstrøms skipet.

Er trykkforskjellen mindre enn dette, vil det typisk oppstå en situasjon med tilbakesjiktning der røyk trenger seg oppunder hengen motstrøms den generelle trekkretningen. Forverrede rømningsforhold må i disse tilfellene forventes både nedstrøms og oppstrøms skipet.

Ved ingen trykkforskjell mellom portalene sjikter røyken seg først oppunder taket, men etter hvert som den avkjøles trekkes den ned langs sidene mot vannoverflaten og etter ca. 10 – 12 minutter oppstår siktforhold under 10 m i rømningshøyde.

Strålingsintensiteten ligger nær brannen i rømningshøyde på rundt 15 kW/m² og synker raskt med avstanden fra brannen. Hva strålingsintensiteten er på rømningsveiene vil imidlertid avhenge av avstand til brannen (se figur 12 under Diskusjon).

Trykkmålinger ved portalene [4] på stedet viser imidlertid at trykkdifferansen mellom portalene vil variere mye og det er også sannsynlig at trekkretning kan skifte under en brannhendelse i tunnelen. Det vil derfor ikke være mulig å ha kontroll på røyken uten aktive ventilasjonstiltak i tunnelen.

6 Referanser

[1] *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, Second edition, H K Versteeg and W Malalasekera, 2007*

[2] *Stad skipstunnel – teknisk forprosjekt, Vedlegg E: Brannkonsept*

[3] *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (NFPA), First Edition, 1988*

[4] *Stad skipstunnel – teknisk forprosjekt, Vedlegg H - Ventilasjon*