



---

# FFI-RAPPORT

---

19/00651

## Eksempelstudie for Statens Vegvesen Vegdirektoratet: Vind- og spredningssimuleringer

Hannibal Eie Fossum  
Anders Helgeland



# **Eksempelstudie for Statens Vegvesen Vegdirektoratet: Vind- og spredningssimuleringer**

Hannibal Eie Fossum  
Anders Helgeland

---

---

## **Emneord**

Bymiljø  
Fluidmekanikk  
Forurensning  
Matematisk mekanikk  
Spredningsmodellering  
Vind

## **FFI-rapport**

19/00651

## **Prosjektnummer**

1394

## **ISBN**

P: 978-82-464-3178-9

E: 978-82-464-3179-6

## **Godkjenner**

Janet M. Blatny, *forskningsdirektør*

Anders Helgeland, *forskningsleder*

Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.

## **Opphavsrett**

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

---

---

## (U) Sammendrag

Denne rapporten har som formål å kartlegge og illustrere hvordan Forsvarets forskningsinstitutt (FFIs) kompetanse og metodikk knyttet til vind- og spredningsberegninger for urbane miljøer kan bidra til å møte behovene til Statens Vegvesen og andre etater i forbindelse med luftforurensningsprediksjon og byplanlegging. Rapporten beskriver en begrenset mulighetsstudie knyttet til vind og spredning i deler av Oslo. Studien er ment å avdekke eventuelt grunnlag for videre utviklingsarbeid.

Prosjektet beskrevet i rapporten består av to faser: I fase 1 er det utført en enkel intervjurunde for å grovt kartlegge kunnskapsbehov og ubesvarte spørsmål, og dessuten hvilken eksisterende metodikk som benyttes hos Vegvesenet og andre etater. Denne informasjonen har så dannet grunnlag for valg av og forberedende arbeid til en problemstilling FFI har jobbet videre med i fase 2, der numeriske beregninger av lokal vind og spredning utføres og tolkes.

Fase 1 er dekket i et tidligere notat, men er også inkludert i denne rapporten for å gi nødvendig kontekst og gjøre rapporten selvforklarende. Resultatene fra FFIs beregninger, samt drøfting av disse, utgjør den resterende delen av rapporten. Resultatene viser at for forurensning over lang tid, store avstander og fra mange kilder er de lokale geometriske detaljene generelt mindre viktige og kan parametriseres, for eksempel ved bruk av overflateruhets-modeller. For kortvarige eller høyintense enkeltkilder kan lokale forhold derimot spille en rolle. Større geometriske trekk, slik som Ekebergåsen eller annen topografi, kan være viktig også for forurensning over lengre tid og avstand.

En konseptuell metodikk for beregning av lokale vindroser er også foreslått, og seks lokale vindroser er beregnet som eksempler. Typiske geometri-effekter er tydelige i flere av de lokale vindrosene, og rosene skiller seg tidvis sterkt fra den globale vindrosen for Oslo.

---

---

## **(U) Summary**

The present report aims to determine and illustrate how the Norwegian Defence Research Establishment's (FFI's) knowledge and methodology related to wind and dispersion calculations for urban areas can contribute to addressing the needs of the Norwegian Public Road Administration (NPRA) and other agencies within the area of air-pollution modeling and urban planning. The report describes a limited study related to wind and dispersion in parts of Oslo. The study aims to uncover potential grounds for further research and development.

The project described in this report comprises two phases: In phase 1, a series of simple interviews have been conducted to roughly map out the existing need for knowledge, as well as which modeling methodologies that are currently being used, by the NPRA and other related agencies. This information forms the basis for the formulation of and preparations to a specific scenario involving numerical simulation of local wind and dispersion, which is performed and analyzed in phase 2.

Phase 1 has been reported in an earlier FFI note, but it is nevertheless included here to provide more context and clarity. The results of FFI's computations and related discussions comprises the remainder of the report. The results show that for long-term, long-range air pollution from multiple sources, local geometrical details are generally not important and can be parameterized, for example by means of surface-roughness models. On the other hand, for short-term or single high-intensity pollution sources, local features may be relevant. Larger geometrical features, such as the Ekeberg hill or other topography, may also be important for pollution in the longer term and over greater distances.

A conceptual methodology for calculating local wind roses have been suggested as well, and six local wind roses have been calculated as examples. Typical geometry effects are evident in several of the local wind roses, and the roses are often distinctly different from Oslos's global wind rose.

---

---

# Innhold

<b>(U) Sammendrag</b>	3
<b>(U) Summary</b>	4
<b>Forord</b>	7
<b>I Fase 1: Kartlegging, valg av problemstilling og forberedende arbeid</b>	
<b>1 Bakgrunn</b>	11
<b>2 Kartlegging: Intervjurunde</b>	13
<b>3 Beskrivelse av problemstilling og løsningsforslag</b>	15
3.1 Valg av problemstilling	15
3.1.1 Del A	15
3.1.2 Del B	18
3.2 3D-modell	18
3.3 Beregningsmodell	19
3.3.1 Beregningsorientert fluiddynamikk (CFD)	19
3.3.2 Matematisk modell	20
3.3.3 Beregningsnett	21
3.4 Vindfelt	21
3.5 Utslipp av forurensning	23
<b>4 Oppsummering og videre arbeid</b>	25
<b>II Fase 2: Resultater fra numeriske simuleringer av vind og spredning</b>	
<b>5 Problemstillingens del A</b>	29
5.1 Beskrivelse av simuleringene	29
5.2 Vindfelt	31
5.2.1 Hastighetsfeltets betydning for spredning og mulige tiltak	35
5.3 Spredning	35
5.3.1 Konsentrasjon og eksponering langs en rute	40
5.3.2 Konklusjoner	42
<b>6 Problemstillingens del B</b>	45
6.1 Konseptuelt forslag	45
6.2 Lokale vindroser	45
6.3 Konklusjoner	47

---

<b>7 Oppsummerende bemerkninger</b>	<b>51</b>
-------------------------------------	-----------

**Tillegg**

**Vedlegg**

<b>A Svar fra spørreundersøkelsen</b>	<b>59</b>
---------------------------------------	-----------

<b>B Beregning av lokale vindroser</b>	<b>63</b>
--	-----------



---

---

## Forord

Merk at første del av denne rapporten ("Fase 1") er identisk med FFI-notat 18/02324, som dokumenterer foreløpig arbeid i samme prosjekt. Teksten inkluderes også i rapporten for å gi kontekst og helhet, og for å gjøre rapporten selvforklarende. Teksten i første del gjengis ordrett (med unntak av korreksjon av skrivefeil) og refererer således til seg selv som "notatet" selv om det i nåværende sammenheng er en del av en sluttrapport.

Beregningsresultene som gjengis og diskuteres i rapportens siste del ("Fase 2") er ikke publisert tidligere.

Merk at punktum (*ikke* komma) benyttes som desimalskilletegn i denne rapporten.





## **DEL I**

### **Fase 1: Kartlegging, valg av problemstilling og forberedende arbeid**



---

---

# 1 Bakgrunn

Vind- og spredningsberegninger basert på beregningsorientert fluiddynamikk (CFD) har vært utviklet og brukt på FFI i godt over et tiår i ulike sammenhenger, både militært og sivilt (se f. eks. Wingstedt et al., 2012a,b; Fossum og Petterson Reif, 2012; Fossum et al., 2012; Gjesdal et al., 2013; Vik et al., 2015; Aalbergsjø og Vik, 2016; Endregard et al., 2016; Wingstedt et al., 2017; Osnes et al., 2017; Fossum et al., 2018). Anvendelsene har vært alt fra spredning av passive gasser i lukkede rom til utendørs spredning av tung gass i stratifisert bakgrunnsstrømning eller spredning fra hjemmelagde eksplosiver.

I såkalte CFD-modeller benyttes ligninger som beskriver fysikken i luftstrømningen og spredningsforløpet. Modellene har typisk som mål å gi løsninger som oppfyller bevaring av masse og bevegelsesmengde<sup>1</sup>, samt bevaring og transport av eventuelle gasser eller aerosoler. Versteeg og Malalasekera (1995) gir en god innføring i CFD-metodikken om det ønskes mer detaljer. Takket være den stadig økende tilgjengeligheten av beregningskraft har CFD etterhvert blitt et vanlig verktøy for pålitelige spredningsberegninger (Lien og Yee, 2004; Coirier et al., 2005; Lien et al., 2006; Santiago et al., 2007; Lateb et al., 2016).

En av hovedårsakene til at CFD-rammeverket ofte velges fremfor raskere og mindre komplekse typer spredningsmodeller, slik som gaussiske puff-modeller (basert på statistikk), er at turbulensen som er til stede i så å si all luftstrømning har en direkte påvirkning på spredningen. Videre er turbulensen ofte sterkt avhengig av geometrien i problemet, og CFD er meget godt egnet til bruk i komplekse geometrier. For å fange opp et av de viktigste fysiske fenomenene som påvirker lokal spredning er altså CFD ofte nødvendig. Ytterligere detaljer om turbulens og turbulent spredning kan leses bl. a. i Tennekes og Lumley (1972) eller Durbin og Petterson Reif (2011).

FFI har som nevnt utført en rekke CFD-studier med ulike anvendelser innen forskning og utvikling. Det har imidlertid ikke vært gjort arbeid direkte relatert til luftforurensningstidligere, bl. a. fordi FFIs fokus først og fremst har vært på samfunnssikkerhet og beredskap utenom rene militære anvendelser.

Luftkvalitetsberegninger dreier seg ofte om mangfoldige og komplekse forurensningskilder, samt simulering over lange tidsforløp koblet sammen med komplekse værmodeller. FFI har ikke gått inn i denne type simuleringer som sådan. Det kan likevel godt tenkes at en del av FFIs eksisterende kompetanse kan benyttes inn mot nåværende eller fremtidige behov hos Statens Vegvesen Vegdirektoratet (SVV) eller andre relevante etater. Særlig kan dette gjelde problemstillinger der geometriske detaljer, lokal mikro-meteorologi (vind på gateplan) og turbulens eller kortvarig nærfeltsspredning er av interesse.

Eksempelstudien beskrevet i dette notatet har derfor som formål å kartlegge og illustrere hvordan FFIs kompetanse og metodikk knyttet til CFD-beregninger for vind og spredning i urbane miljøer kan bidra til å møte Vegvesenets og andre etaters behov i forbindelse med luftforurensningsprediksjon. Notatet beskriver således en begrenset mulighetsstudie for å avdekke eventuelt grunnlag for videre utviklingsarbeid.

Prosjektet dette notatet er en del av består av to faser: I fase 1 er det, ved bruk av en enkel intervjurunde, undersøkt hvilket kunnskapsbehov, hvilke ubesvarte spørsmål og hvilken eksisterende metodikk

---

<sup>1</sup>Bevaring av energi er også viktig i strømninger der dette er relevant.

---

---

som benyttes av SVV og andre kommunale etater. Denne informasjonen danner grunnlag for valg av, og en del forberende arbeid til, en problemstilling FFI skal jobbe videre med i fase 2. Dette notatet dekker kun fase 1 og inkluderer altså en beskrivelse av valgt problemstilling og planlagt løsningsstrategi.

Resultatene av FFIs beregninger, samt drøfting av disse, vil rapporteres i et eget notat for fase 2 på et senere tidspunkt.

Oppsummert er hovedformålene med fase 1 av prosjektet følgende:

- Kartlegge i grove trekk hvilket kunnskapsbehov, hvilke ubesvarte spørsmål og hvilken eksisterende metodikk som benyttes av Vegvesenet og andre kommunale etater når det gjelder beregninger av vind og spredning i urbane områder.
- Formulere én eller flere problemstillinger basert på innhentet informasjon fra kartleggingsdelen.
- Skissere forslag til løsning på valgt problemstilling i form av CFD-beregninger med FFIs eksisterende metodikk, samt utføre nødvendig forberende arbeid til slike beregninger.

---

---

## 2 Kartlegging: Intervjurunde

I samråd med SVV ble en rekke spørsmål stilt pr. epost til mottakere anbefalt av SVV for å fremskaffe en oversikt over nåværende situasjon hva gjelder beregninger av vind og spredning i urbane miljøer. Spørsmålene som ble sendt ut var som følger:

1. Hva slags problemstillinger, knyttet til luftstrømning, gasspredning og forurensning, er typisk aktuelle for dere?
2. Hva er ditt ansvarsområde i din organisasjon?
3. Tar dere i bruk beregningsverktøy (som viser lokal vind eller luftkvalitet) som underlag i analyser og/eller for å se på effekten av ulike tiltak? Hvis ja,
  - (a) Til hvilke problemstillinger?
  - (b) Hvilke verktøy blir brukt?
4. Finnes konkrete spørsmål eller problemstillinger som er vanskelige å løse med beregningsmodellene dere benytter i dag?
5. Finnes konkrete problemstillinger der dere ønsker å se på den lokale, kortvarige effekten av utslippskilde eller geometri (eller kombinasjonen av disse)?
6. Hvilke avstander (altså hvilket detaljnivå) er mest relevant for deres arbeid? (1 m, 10 m, 100 m, 1 km, 10 km. . . ?)
7. Har dere sikkerhetsmarginer, statistiske metoder eller andre kriterier som dere ønsker at vi benytter oss av i beregning eller formidling av resultater?

Grunnet kort prosjektperiode for denne eksempelstudien ble også mottakerliste og svarfrist rimelig korte. Totalt responderte seks mottakere på eposten. En liste over respondentenes organisasjonstilhørighet og en oppsummering av svarene i form av stikkord og svarfrekvens er gjengitt i Tabell A.1 i Tillegg A.

Kort oppsummert peker den gjennomførte spørreundersøkelsen på noen hovedtrekk:

- Det finnes en rekke ulike problemstillinger knyttet til vind, spredning og forurensning, men blant respondentene var flertallet opptatt av overordnede luftkvalitetsberegninger, f. eks. utvikling av luftsonekart, for representative meteorologiske år. Mer detaljerte beregninger synes dog å være relevant for nærkilde-spredning, tiltaksplaner og beregnet effekt av ny bebyggelse.
- En rekke beregningsmodeller er i bruk, bl. a. SoundPLAN Air (med GRAMM/GRAL), MISKAM, AERMOD View, AirQUIS og uEMEP. En del av disse modellene er CFD-baserte, men med oppløsninger på vindfeltet som er langt grovere enn det som er nødvendig for å beregne lokale vindforhold i urbane/bebyggede områder.
- De problemstillingene som nevnes i sammenheng med beregninger av lokale, kortvarige effekter av luftkvalitet er informasjon om tilstanden i gatekanaler, utfordringer knyttet til tunnel-/lokkmunninger og informasjon om lokale vindroser. I tillegg nevnes modellering i kompliserte områder der stagnasjon, ventilasjon eller vindretning endres av bygningsmasse, samt en generell mangel på kunnskap om hva som skjer på detaljnivåer mindre enn 100 m. Halvparten av respondentene fant slike lokale korttidseffekter relevante for sine problemstillinger, mens den øvrige halvparten ikke var interesserte i lokale korttidseffekter.

- 
- Det synes ikke å foreligge noen standardiserte sikkerhetsmarginer eller statistiske metoder for å vurdere eller analysere beregningsresultater, utover de retningslinjer som legges til grunn i T-1520. Ikke overraskende ønskes imidlertid en drøfting av representativitet og usikkerhet i utførte beregninger.

Denne oppsummeringen tyder på at interessen for detaljer på gateplan er tilstede hos enkelte aktører, men langt fra alle. Blant dem som ser et behov for slike detaljerte beregninger, ser det ut til at lokale vindforhold og problemer knyttet til gateløp og munnings er mest fremtredende.

FFI hadde opprinnelig håpet på svar som ga ett eller flere konkrete eksempler på problemstillinger der kunnskap om detaljer i lokal vind og/eller spredning var av interesse. I mangel på dette er en problemstilling valgt basert på de mer generelle tilbakemeldingene i spørreundersøkelsen.



---

---

## 3 Beskrivelse av problemstilling og løsningsforslag

### 3.1 Valg av problemstilling

I mangel på konkrete eksempler i tilbakemeldingene på spørreundersøkelsen er det valgt en problemstilling basert på noen hovedtrekk i svarene:

Noe som fremkommer i flere svar er utfordringer knyttet til spredning fra tunnelmunninger. Slike munninger er ofte en betydelig kilde til luftforurensning, og det er mulig lokale tiltak (f. eks. egnet fysisk skjerming) kan spille en viktig rolle.

Et annet punkt som nevnes i flere svar er ønsket om mer kunnskap om lokal vind, altså vind i bygatene. Dette kan være av interesse også uavhengig av luftforurensning, f. eks. når det gjelder vindkomfort eller støy.

I lys av begge overnevnte temaer kan flere problemstillinger skisseres. En todelt problemstilling er valgt, der begge delproblemene kan illustreres for samme geografiske område.

#### 3.1.1 Del A

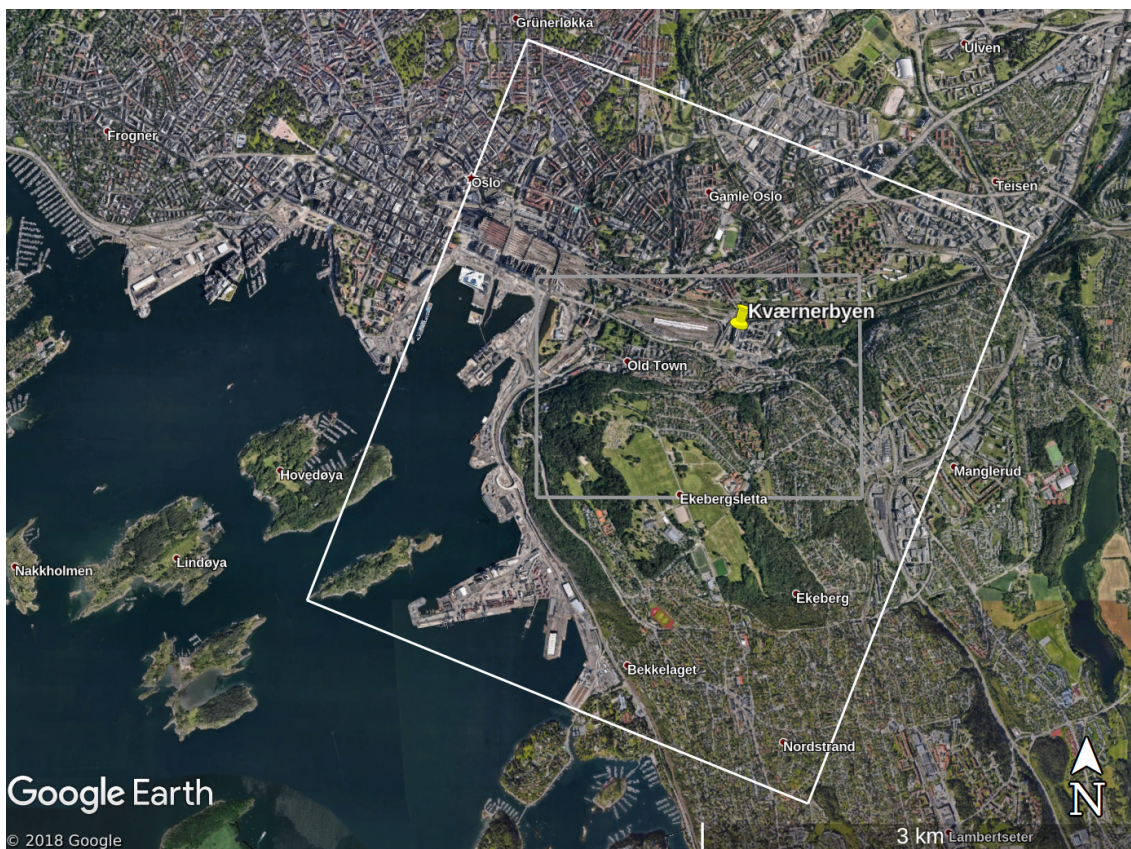
I del A skal spredning fra tunnelmunning undersøkes for tunnelmunningene ut fra Operatunnelen og Vålerengtunnelen på E6 ved Kværnerbyen. Figur 3.1 viser det valgte området. I beregningene antas meteorologisk vind på 1.5 m/s normalt inn fra beregningsområdets mest sørlige rand, altså vind omtrentlig fra sør-sørvest. Detaljer om antatte værforhold diskuteres nærmere i delkapittel 3.4.

Hver tunnelmunning *ut* av tunnelen (i kjøreretningen) regnes som en forurensningskilde med en gitt kildestyrke, og spredningen av forurenset luft fra disse kildene vil beregnes dynamisk ved hjelp av CFD-modellering (se delkapittel 3.3.1).

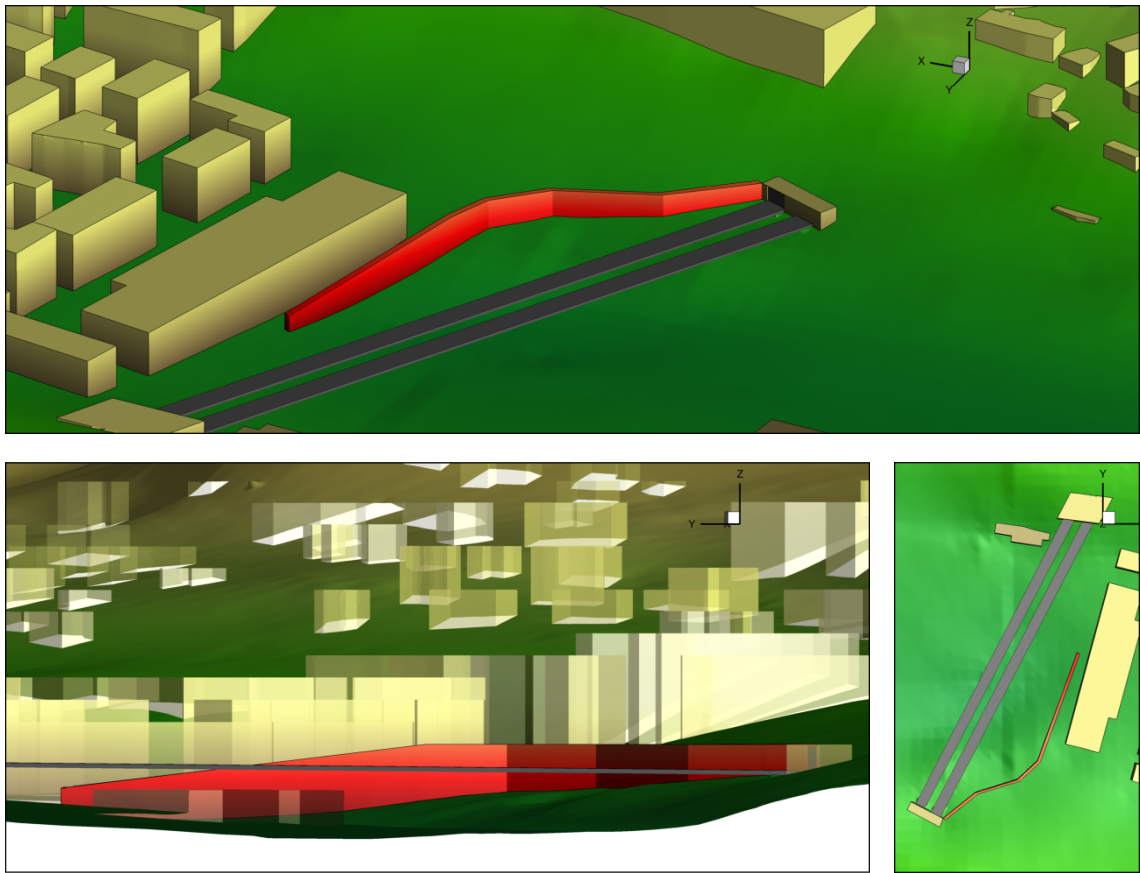
Del A vil bestå av to simuleringer, med mulighet for ytterligere to simuleringer hvis det gjenstår tilstrekkelig tid i prosjektet når de to første simuleringene er gjennomført. Først vil en grunnsimulering kjøres for området og vinden diskutert ovenfor. Dette vil gi et bilde av detaljnivået og informasjonen som er tilgjengelig i typiske spredningssimuleringer med gjeldende metodikk, og resultatene vil fungere som en referanse for resterende simuleringer. I tillegg vil det utføres en simulering med endret geometri, der en beskyttende vegg settes opp ved den sørlige tunnelmunningen for å undersøke lokal effekt av slik skjerming. Den skjermende veggen holder samme høyde som tunnelmunningen (ca. 6 m over veiplanet) i omtrent 100 m lengde ut fra munningen, for deretter å synke ned mot bakken de siste 75 m. Veggen er illustrert i Figur 3.2.

Hvis prosjektet får tilstrekkelig tid, vil også effekter av kildetemperatur undersøkes i grove trekk. De to simuleringene beskrevet i foregående avsnitt vil i så tilfelle kjøres på nytt, men med den ekstra antakelse at lufta ut av tunnelmunningene er 4 ° C varmere enn omgivelsene. Dette kan gi en indikasjon på effekten av slik oppdrift fra kilden på spredningen.

De fire simuleringene som planlegges er oppsummert i Tabell 3.1.



*Figur 3.1 Det valgte beregningsområdet for simuleringene (hvit firkant), samt området der bygningsmasse er inkludert i modellen (grå firkant). Interesseområdet (Kværnerbyen) er markert med gul knapp. (Bilde fra Google Earth.)*



*Figur 3.2 Fysisk skjerming (vist som rød struktur) som skal inkluderes i to av simuleringene (II og IV i Tabell 3.1) i problemstillingens del A. Tre ulike synsvinkler er illustrert.*

Tabell 3.1 De fire simuleringene i eksempelstudiens del A.

Simulering	Endret variabel fra simulering I
I	–
II	Fysisk skjerming, ref. Figur 3.2
III	Høyere kildetemperatur ( <i>hvis tid</i> )
IV	Høyere kildetemperatur + fysisk skjerming ( <i>hvis tid</i> )

Avslutningsvis for del A bør det presiseres at problemstillingen skissert her – og løsningsmetodikken som gis i det følgende – er egnet til å vurdere den *isolerte* effekten av fysisk veggskjerming og/eller oppdrift på spredningsforløpet kun over en kortere periode<sup>2</sup>. Det tas ikke hensyn til kjemiske reaksjoner eller evt. bakgrunnskonsentrasjon fra andre kilder.

### 3.1.2 Del B

I del B skal lokale vindforhold som skyldes bygningsmasse belyses på to ulike måter.

Først skal detaljerte strømlinjer for vind i byrommet beregnes og tegnes opp for den gitte meteorologiske vinden nevnt tidligere (fra sør-sørvest). Slik kan det illustreres hvordan lokal gjennomsnittretning på vinden vil se ut for gitte meteorologiske forhold. Slike beregninger kan utvides til å inkludere flere meteorologiske vindretninger eller mer informasjon (som f. eks. turbulent intensitet eller frekvens på vindkast), men innen rammen av denne eksempelstudien vil ikke slike utvidelser inkluderes.

I tillegg skal det, basert på data fra tidligere utførte vindberegninger for Oslo (Fossum og Helgeland, 2017), beregnes lokale vindroser på utvalgte plasseringer i beregningsområdet. I praksis betyr dette at meteorologiske vindroser, f. eks. fra målestasjonen på Blindern i Oslo, benyttes i kombinasjon med beregninger av sammenhengen mellom meteorologisk og lokal vind til å estimere lokale vindroser i byrommet. Man kan således beregne sannsynligheten for ulike vindretninger på mikronivå, f. eks. i en gate eller et kryss av særlig interesse.

De tidligere beregningsdataene som benyttes i denne delen av problemstillingen er beregnet i et 150 km<sup>2</sup> område av Oslo (med bygningsmasse inkludert i hele modellen) for 18 ulike vindretninger, men beregningene er gjort med grovere oppløsning enn beregningene i del A. Igjen må det presiseres at gjeldende prosjektramme kun tillater en rask mulighetsstudie bl. a. for å illustrere FFIs metodikk. Det vil derfor ikke bli satt av ressurser til verifisering og kvalitetssikring utover det arbeidet som allerede er gjort i tidligere FFI-beregninger der andre anvendelser har vært i fokus.

## 3.2 3D-modell

Vind- og spredningssimuleringene i del A av problemstillingen skal beregnes for området vist i kartet i Figur 3.1. For å effektivisere beregningene er bygningsmassen modellert kun innenfor den

<sup>2</sup>En "kortere periode" vil i denne sammenheng tilsvare en tidsperiode uten vesentlige endringer i gjennomsnittelig vind, lufttemperatur eller kildestyrke.

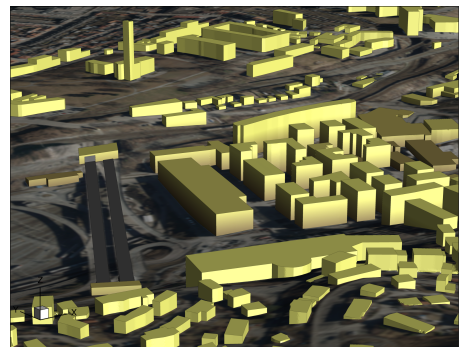
---

grå firkanten i figuren<sup>3</sup>, mens topografien er inkludert i hele modellområdet. Kartdata (og flyfoto) for topografi og bygningsmasse er hentet fra Kartverket via *Norge Digitalt*<sup>4</sup>.

Kartdataene for beregningsområdet bearbeides og danner grunnlag for 3D-modellen som er illustrert i Figur 3.3. Figur 3.3a viser et oversiktsbilde av den delen av 3D-modellen der bygningsmassen er inkludert. De modellerte bygningene er synlige som gule strukturer i modellen. I tillegg viser Figur 3.3b et nærbilde av E6 og Kværnerbyen for å illustrere detaljnivået i modellen.



(a) Den delen av 3D-modellen som inkluderer bygningsmasse.



(b) Nærbilde av modellen ved E6/Kværnerbyen.

*Figur 3.3 Deler av 3D-modellen som benyttes i beregningene i problemstillingens del A. Ortofoto er projisert på den topografiske flaten for å gi en geografisk referanse.*

Mer informasjon om hvordan kartdataene er bearbeidet for å skape 3D-modellen finnes i en tidligere FFI-rapport (Fossum og Helgeland, 2017).

### 3.3 Beregningsmodell

#### 3.3.1 Beregningsorientert fluiddynamikk (CFD)

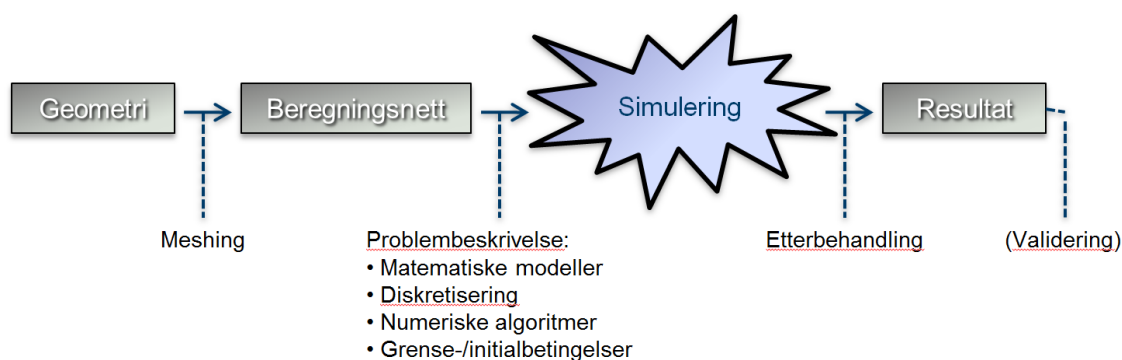
CFD som verktøy favner en rekke ulike modeller med stor variasjon i detaljnivå og egnethet for ulike fysiske fenomener. Generelt benyttes CFD i de tilfellene der man ønsker å beregne den underliggende fysikken i et fluiddynamisk problem (i motsetning til rent parametriske eller statistiske modeller), men der ligningene som beskriver fysikken ikke lar seg løse analytisk. CFD er altså løsning av slike ligningsystemer gjennom numerisk programvare på en datamaskin.

Arbeidsflyten i CFD-beregninger er skissert i Figur 3.4, og innebærer følgende nøkkeloppgaver:

<sup>3</sup>Merk at en større del av den modellerte bygningsmassen ligger oppstrøms interesseområdet (Kværnerbyen), slik at lokale vindretninger og turbulens er fullt utviklet innen vinden ankommer interesseområdet.

<sup>4</sup>Datagrunnlaget er datert 28.08.2015 og hentet fra <https://www.geonorge.no/Geodataarbeid/geografisk-infrastruktur/Norge-digitalt/>

1. Utgangspunktet er som regel et fysisk problem med en tilhørende 3D-modell (Kværnerbyen med omegn i denne eksempelstudien).
2. 3D-modellen må så *diskretiseres*, altså deles opp i et stort antall mindre og enklere geometriske komponenter (f. eks. triangler og tetrahedere) for å danne et *beregningsnett* eller *mesh*.
3. Deretter må problemstillingen beskrives matematisk ved bl. a. ligninger som beskriver fysikken og grensebetingelsene<sup>5</sup>.
4. Selve CFD-simuleringen innebærer at den numeriske programvaren løser ligningene som beskriver den relevante fysikken over hele beregningsnettet for å utvikle en løsning.
5. Til slutt må den beregnede løsningen bearbejdes og tolkes. Sistnevnte kan gjøres i form av f. eks. tallverdier, grafer, konturkart eller 3D-animasjoner.



Figur 3.4 Typisk arbeidsflyt for CFD-arbeid (fra venstre mot høyre).

### 3.3.2 Matematisk modell

I urban vind- og spredningsmodellering av den typen som diskuteres her, er det primært ligninger for bevaring av bevegelsesmengde, masse og eventuelle skalarer (f. eks. luftforurensning) som løses. I denne eksempelstudien løses disse ligningene i kombinasjon med en relativt sofistikert turbulensmodell som beregner storskala-turbulens direkte (såkalt *large-eddy simulation* eller LES). Det er dermed bare turbulens på små skalaer (og med lite kinetisk energi) som modelleres parametrisert. Programkoden *Cliff* (v. 4.0.8) fra Cascade Inc. og denne kodens LES-formulering er brukt til å løse de relevante ligningene (Mahesh et al., 2002; Ham og Iaccarino, 2004; Mahesh et al., 2004; Ham et al., 2006) både i problemstillingens del A og del B.

Nyere litteratur peker i stadig større grad på at LES er særlig godt egnet til urbane vind- og spredningsberegninger, bl. a. (men langt fra utelukkende) fordi geometri er viktig (Pullen et al., 2005; Gousseau et al., 2011; Tominaga og Stathopoulos, 2013; Lateb et al., 2016; Tominaga og Stathopoulos, 2016; Dai et al., 2018; García-Sánchez et al., 2018; Tolia et al., 2018). Som for alle andre CFD-modeller kreves betydelig kompetanse og en del praktisk erfaring for god og korrekt bruk av LES. Det er viktig å kjenne til de underliggende fluidmekaniske prinsippene for modellen for å produsere pålitelige løsninger. Mer informasjon om FFIs CFD-metodikk, inkludert ligningsformuleringer og detaljer om LES-modellen, finnes bl. a. i Fossum et al. (2018).

<sup>5</sup>I denne eksempelstudien inkluderer grensebetingelsene en matematisk formulering av den meteorologiske vinden.

---

---

### 3.3.3 Beregningsnett

Som nevnt tidligere må 3D-modellen av beregningsområdet diskretiseres til et beregningsnett for at CFD-programvaren skal kunne løse de relevante ligningene. Generelt vil en høyere oppløsning på beregningsnettet (dvs. flere beregningspunkter) gi en mer pålitelig og nøyaktig løsning, mens et grovere nett vil føre til kortere beregningstid. Grovt sett kan det antas at innen visse rammer vil en dobling av antall beregningspunkter i beregningsnettet gi opp mot en tredobling i regnetid, men dette avhenger også av flere faktorer.

Kravene til beregningsoppløsning avhenger sterkt av målet med simuleringen (bl. a. hva slags data man vil hente ut), men generelt peker nyere studier på at urbane vind- og spredningsberegninger med CFD bør nærme seg en oppløsning på 1 m i interesseområdet, samt løse opp større bygg med minst 10 punkter i hver retning (Franke et al., 2011; Xie og Castro, 2009; Toliás et al., 2018). I tillegg gis en del anbefalinger om bl. a. størrelsen på beregningsområdet for å unngå feilkilder fra grensebetingelsene (Franke et al., 2011; Blocken, 2015; Tominaga og Stathopoulos, 2016).

Beregningsnettet som benyttes i del A av denne eksempelstudien er illustrert i Figur 3.5. Beregningsområdet og -nettet er i tråd med typiske anbefalinger fra litteraturen. Noen nøkkeltall for beregningsnettet er oppsummert i Tabell 3.2. Tidsskrittet som benyttes i simuleringen – altså oppløsningen i tid for vind-/spredningsberegningen – avhenger av både lokale vindhastigheter og oppløsning på beregningsnettet. Med parametrene oppgitt i Tabell 3.2 kan det antas at tidsskrittet vil ligge mellom 0.1 og 0.3 s.

Beregningsnettet og tidsskrittet som er benyttet i problemstillingens del B er noe grovere enn for del A, se Fossum og Helgeland (2017).

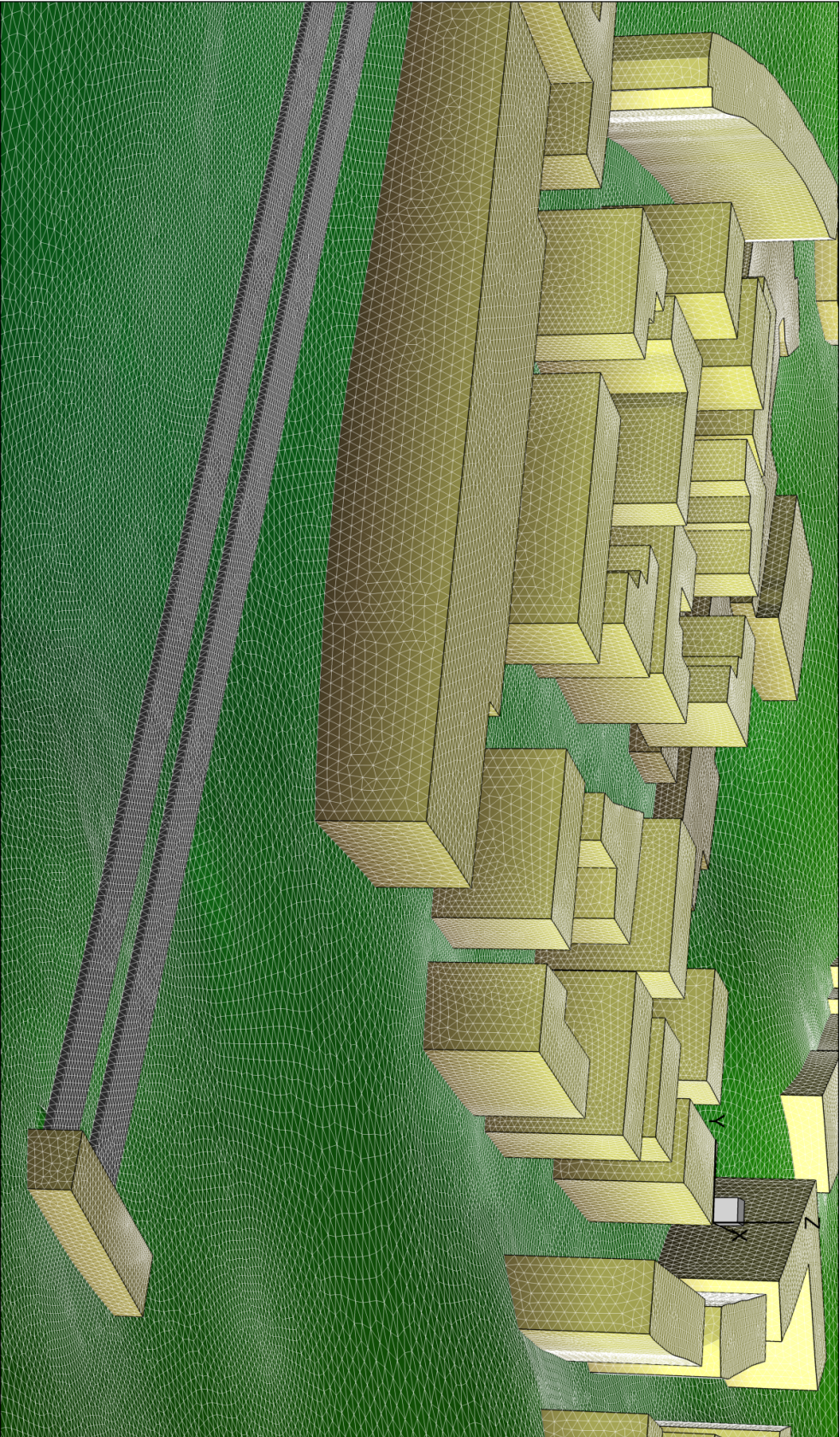
*Tabell 3.2 Noen nøkkeltall som beskriver beregningsnettet.*

Beskrivelse	Verdi
Fysiske dimensjoner (L × B × H) [m <sup>3</sup> ]	4214 × 3745 × 4000
Antall beregningspunkter	5 832 568
Nominell celledengde (min, max) [m]	0.5, 64
Cellevolum (min, max) [m <sup>3</sup> ]	0.006, 1.04 · 10 <sup>6</sup>
Geometrisk vekstrate i volumet	1.14

Basert på informasjon om beregningsnettet, tidsskrittet, CFD-koden og FFIs tilgjengelige regneressurser, kan det antas at omtrentlig simuleringstid vil være 6-12 dager per simulering. Det vil imidlertid være mulig å kjøre flere simuleringer parallelt dersom det er regneressurser tilgjengelig. Dette medfører at omtrentlig simuleringstid for alle simuleringene tilsammen er alt fra 6 til 48 dager.

## 3.4 Vindfelt

For problemstillingens del A antas det meteorologisk gjennomsnittsvind på 1.5 m/s (i 10 m høyde) fra 20° vinkel relativ til sørlig retning, dvs. omtrent sør-sørvestlig vind. Dette medfører vind normalt



*Figur 3.5 Overflaten av beregningsnettet som benyttes i beregningene (for del A) er vist i hvitt, lagt på 3D-modellen.*



---

---

inn fra sørlige beregningsrand i Figur 3.1. Innkommende vind fra sørlige beregningsrand antas å følge et middelprofil, gitt ved

$$U(z) = U_0 \left( \frac{z - z_0}{z_r} \right)^\alpha, \quad (3.1)$$

nær bakken (< 500 m over bakken), med turbulente fluktuasjoner for nøytrale forhold gitt fra Stull (2017). I middelprofilet gitt i ligning (3.1) er  $z$  høyden over bakken,  $z_0 = 0$  m og  $z_r = 500$  m er hhv. forflytningshøyde og referansehøyde,  $U_0 = 4.0$  m/s er referansehastigheten i referansehøyden, og  $\alpha = 0.25$  er profil-eksponenten.

Randbetingelsene for vind (og eventuelt temperatur) kan endres for å reflektere andre konkrete værforhold om ønskelig, men i denne eksempelstudien er et “generisk” profil for en typisk meteorologisk vindretning i Oslo<sup>6</sup> valgt for enkelhets skyld. Det antas i denne omgang også isoterme forhold og tørr luft.

Mindre detaljer i det innkommende vindfeltet<sup>7</sup> er ikke av stor betydning for spredningen i interesseområdet (byrommet ved Kværnerbyen), ettersom dynamikken i dette området i stor grad styres av geometri, altså topografi og bygningsmasse. Dette er også grunnen til at beregningsområdet er såpass mye større enn interesseområdet, samt at mye bygningsmasse er inkludert oppstrøms utslippskildene – vindfeltet vil av denne grunn få tid til å utvikle seg dynamisk under påvirkning av geometrisk “ruhet” fra bygningsmassen, slik at et realistisk og dynamisk konsistent vindfelt ankommer interesseområdet. Merk imidlertid at antakelsene om vind diskutert ovenfor også betyr at statistiske variasjoner i storskala-meteorologien ikke er inkludert i beregningene.

I problemstillingens del B er 18 ulike vindretninger simulert med et intervall på 20°, slik at hele vindrosen er dekket. Middelprofilet gitt i ligning (3.1) er brukt som grensebetingelse også i del B, men med andre parametre<sup>8</sup>.

### 3.5 Utslipp av forurensning

Utslipp og tilhørende beregninger av spredning gjelder kun for problemstillingens del A. Hver tunnelmunning  $ut$  av tunnelene (i kjøreretningen) ved Kværnerbyen regnes som en forurensningskilde med en gitt kildestyrke, dvs. en spesifisert skalarfluks.

I beregningene benyttes relative kildestyrker, slik at beregnede konsentrasjoner senere kan skaleres med ønsket kildestyrke for å finne absolutte konsentrasjonsverdier i beregningsområdet. Kilden antas å være kontinuerlig med samme styrke gjennom hele beregningsløpet.

Utslippet modelleres ved en svak luftstrømning (0.1 m/s) ut av hver tunnelåpning. Denne luftstrømmen vil ha en ubetydelig dynamisk effekt, men den gir en konsistent definisjon av forurensningskilden. Lufta som kommer ut av åpningene vil ha en gitt konsentrasjon av “forurensning”. Hvorvidt denne forurensningen gjelder små partikler,  $NO_x$  eller annet er irrelevant for beregningens del, gitt følgende antakelser:

---

<sup>6</sup>Basert på data fra Blindern målestasjon, se f. eks. <https://www.windfinder.com/windstatistics/oslo-blindern>

<sup>7</sup>Med “mindre detaljer” menes små variasjoner i middelprofilet eller vindretningen, samt variasjoner (også av større grad) i turbulensprofilene.

<sup>8</sup>Dette har liten effekt på vindens *retning* i bygatene.

- 
- 
- Dersom forurensningen gjelder partikler, så er disse tilstrekkelig små.
  - Det forurensende stoffet er inert, dvs. partiklene/gassen reagerer ikke kjemisk innenfor det tidsrommet som simuleres.
  - Effekten av deponering kan neglisjeres.

Disse antakelsene kan mykes opp via visse utvidelser i simuleringene, men innen rammene av dette prosjektet har ikke dette vært hensiktsmessig.

Når det gjelder konsentrasjonsverdien i lufta som kommer ut av tunnelåpningene (altså kildestyrken) kan denne enkelt skaleres etter at beregningene er utført og er derfor ikke nødvendig å definere i forkant av analysen. Selve spredningen av forurenset luft, dvs. utviklingen av konsentrasjonsverdier i beregningsområdet relative til kildestyrken, simuleres ved å løse en bevaringsligning for ett skalarfelt per utslippkilde.

I lys av dette og foregående avsnitt vil spredningssimuleringene utført i problemstillingens del A altså kunne analyseres for å finne timesgjennomsnittelig konsentrasjon av forurensning som skyldes tunnelåpningene, under de gitte værforhold. Det vil således også bli mulig å sammenligne verdier for de ulike simulerte tilfellene i Tabell 3.1, samt på ulike steder (også meget lokalt) i beregningsområdet.

---

---

## 4 Oppsummering og videre arbeid

I dette notatet er FFIs typiske metodikk for vind- og spredningsberegninger i urbane områder raskt oppsummert i lys av eksempelstudien som skal utføres for SVV.

Mulighetene og begrensningene i FFIs metodikk er belyst, og SVV og andre etaters behov og ønsker er forsøkt kartlagt. Som et resultat av sistnevnte er en problemstilling i to deler valgt ut for å illustrere typiske simuleringsdata fra FFIs metodikk, samt mulig bruk av disse.

I del A er hovedformålet å gi et bilde av detaljnivået og informasjonen som er tilgjengelig i simuleringer ved bruk av FFIs CFD-metodikk. I den valgte problemstillingen skal metodikken eksemplifiseres gjennom å undersøke lokal, kortvarig effekt av fysisk skjerming og eventuelt kildetemperatur. Dette er et mer eller mindre vilkårlig valgt eksempel på anvendelse, og andre områder eller problemstillinger kunne like gjerne vært brukt.

I del B skal lokal vindretning i byrommet illustreres, og lokale vindroser skal estimeres basert på tidligere beregnede lokale vinddata.



---

## **DEL II**

### **Fase 2: Resultater fra numeriske simuleringer av vind og spredning**



---

---

## 5 Problemstillingens del A

I dette kapitlet presenteres resultatene fra bruken av FFIs CFD-metodikk for å undersøke spredning av forurensning fra tunnelmunningene ut fra Operatunnelen og Vålerengtunnelen på E6 ved Kværnerbyen (se kapittel 3.1.1 for en detaljert beskrivelse av problemstillingen).

Resultatene fra simulering I og II i Tabell 3.1, samt resultater fra en ekstra simulering, rapporteres og drøftes. Data relatert til hastighetsfeltet (vind og turbulens) gjennomgås først, med noe drøfting om hva disse resultatene kan bety for spredningen av forurensning. Deretter vil selve konsentrasjonsfeltene for forurensning diskuteres.

### 5.1 Beskrivelse av simuleringene

I utgangspunktet var det planlagt å gjennomføre to ulike simuleringer for å demonstrere og studere detaljnivået og informasjonen som er tilgjengelig ved bruk av FFIs CFD-metodikk, samt effekten av fysisk sperring for å redusere lokal forurensning.

I tillegg, hvis prosjektet fikk tilstrekkelig tid, skulle det gjennomføres to ytterligere simuleringer for å studere effekter av kildetemperatur (se tabell 3.1 for en oversikt over planlagte simuleringer).

Som resultatene snart vil vise, ga simulering I og II (i tabell 3.1) meget like resultater. Det ble derfor gjennomført en ekstra simulering med en alternativ fysisk skjerming fremfor å studere effekter av kildetemperatur. Tabell 5.1 oppsummerer det endelige utvalget simuleringer, der simulering IIb referer til den alternative skjermingen. I simulering IIb er det nordgående tunnellopet fra Operatunnelen forlenget med 140 m, som illustrert i Figur 5.1.

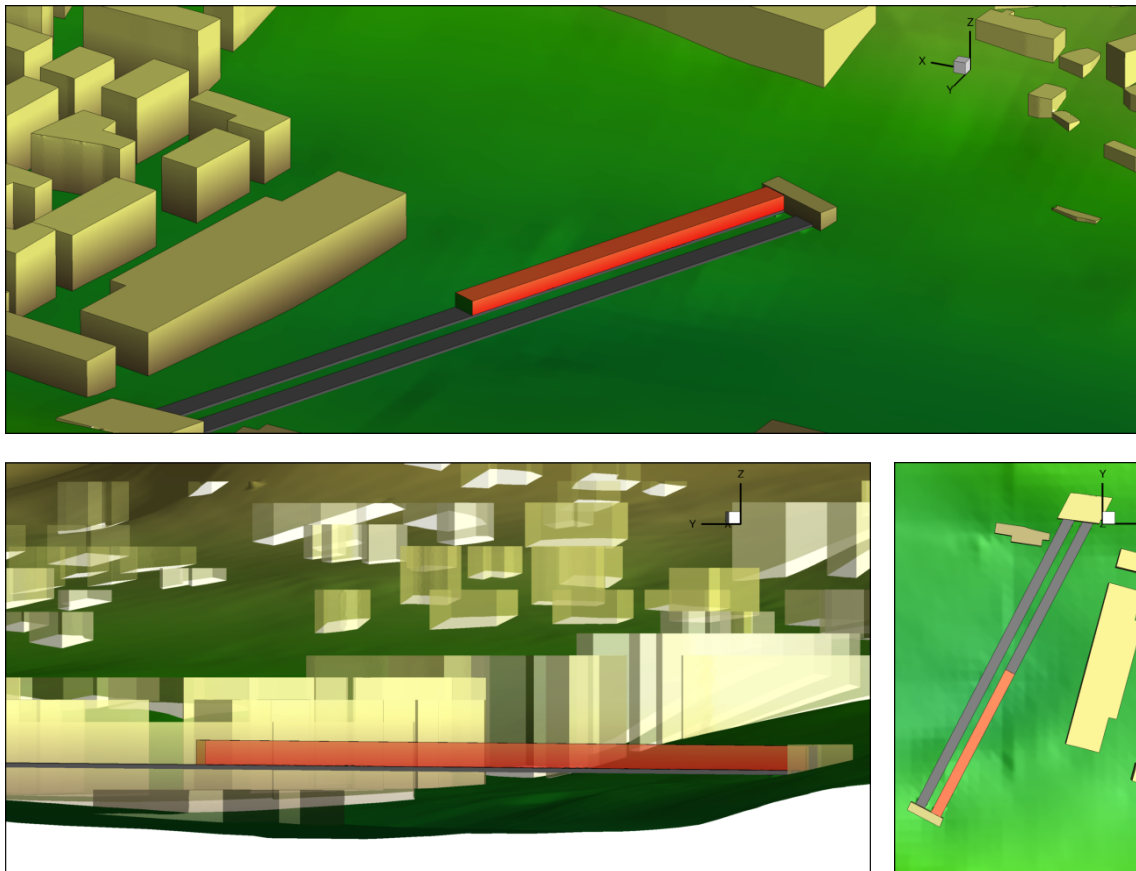
*Tabell 5.1 De tre endelig valgte simuleringene i eksempelstudiens del A.*

Simulering	Endret variabel fra simulering I
I	–
II	Fysisk skjerming, ref. Figur 3.2
IIb	Forlengelse av tunnellop, ref. Figur 5.1

Alle simuleringene er kjørt med samme oppsett hva gjelder numeriske og andre relevante parametre. Beregningsnettet er drøftet i rapportens del 1, med oppsummerende data i Tabell 3.2. Valg av LES som turbulensmodell, også diskutert i del 1, medfører at simuleringene gir store 3D-datasett som også varierer i tid. Dette betyr at resultatene som regel må analyseres statistisk. I vårt tilfelle, med antatt statistisk konstante meteorologiske forhold og forurensningskilder som ikke varierer i tid, kan gjennomsnittelige vind- og konsentrasjonsverdier beregnes ved å tidsmidle simuleringens dataene.

Under innsamling av statistikk fra simuleringene (for vind- og konsentrasjonsdata), er tidsskrittet i beregningene satt til  $\Delta t = 0.1$  s.

For hver simulering er det samlet statistikk for 72 000 tidskritt, tilsvarende to timer med datainnsamling. Den mest relevante tidsskalen for å beregne midlingstid i et urbant miljø er



*Figur 5.1 Ny tunnelforlengelse (vist i rødt) som skal inkluderes i simulering IIb i Tabell 5.1. Tre ulike synsvinkler er illustrert.*



---

---

basert på en typisk tidsperiode for virvelavsetning bak bygninger. For en enkelt bygning avhenger denne perioden av bygningens størrelse og form, samt vindhastigheten. Typiske perioder ligger i spennet mellom 5 og 90 s. For de “trege” avsetningene (altså opp mot 90 s), vil to timers midlingstid fange opp omtrent 80 virvler<sup>9</sup>. Før statistikkinnsamlingen startet opp, ble 6 000 tidsskritt med  $\Delta t = 0.3$  s, som altså tilsvarer 30 minutter, simulert for å generere et statistisk fullt utviklet vind- og konsentrasjonsfelt.

## 5.2 Vindfelt

I urbane miljøer vil mikrometeorologien, dvs. den lokale vinden, ofte være annerledes enn den (meso-)meteorologiske vindretningen på grunn av geometri. Kombinasjonen av mange komplekse bygninger (og evt. topografi) gir et sammensatt vindfelt som er vanskelig å forutsi uten simuleringer. Likevel er det noen grunnleggende vindfenomener man ofte finner i urbane strøk. Disse fenomenene kan sees på som “byggsteinene” for det totale vindfeltet og de mest fremtredende av dem er som følger.

- **Vindtrekk nedover (*downdraft*):** For bygninger av en viss høyde, vil vind kunne trekke nedover på nedre del av byggets oppside (veggen som vender mot vinden). Denne nedadgående vinden vil også gjerne medføre en motstrømsvind langs bakken.
- **Økende vind med høyde:** På grunn av friksjon er vinden svakere nær bakken. Vinden kan være langt sterkere høyt oppe, f. eks. på toppen av et bygg. Dette gjelder ikke bare i urbane områder; også over åser og fjell merker man ofte mer vind.
- **Transversal vind:** På oppsiden av bygninger, samt i gateløp som krysser den meteorologiske vindretningen, kan man få betydelig vind på tvers av gjeldende meteorologisk vindretning.
- **Resirkulasjonssoner og motstrømsvind:** På nedsiden (veggen som vender fra vinden) av bygninger kan det dannes resirkulasjonssoner, der vinden går i en sirkulær strømning. Dette leder både til motstrømsvind nær bakken, og det kan medføre at gasser og aerosoler kan oppholde (og opphope) seg i slike områder over lang tid.
- **Kanaliserings-effekt i gateløp:** Lange gateløp fungerer ofte som kanaler for vinden og vil derfor gjerne gi opphav til vind i samme retning som gateløpet. Dette kan gi både vind på tvers av og rett mot den meteorologiske vindretningen.
- **Venturi-effekten:** Mellom to bygninger, samt i gateløp, vil ofte luftstrømningen snevres inn. Dette kan føre til en betraktelig økning i vindhastighet i innsnevringen (for å “få unna” nok luft).
- **Virvelavsetning (*vortex shedding*):** Langs kantene av bygninger vil det som regel avsettes virvler regelmessig. Disse virvlene er en betydelig kilde til turbulens nedstrøms bygget. Frekvensen på avsetningen varierer med vindhastighet, bygningsstørrelse og byggets form, men er typisk av størrelsesorden 1 pr. min.

Figur 5.2 viser det gjennomsnittlige vindfeltet, *middelvinden*, tre meter over bakken i interesseområdet for simulering I. Noen av fenomenene diskutert ovenfor er tydelige (slik som

---

<sup>9</sup>En viktig betraktning i byområdet valgt i denne eksempelstudien gjelder Ekebergåsen, som også vil ha sin egen virvelavsetningsperiode. Grunnet åsens størrelse vil perioden her sannsynligvis være en del lengre enn 90 s, som derved medfører noe svakere statistikk i områder i le av åsen.

---

---

resirkulasjonsoner på nedsiden av enkelte bygg, samt Venturi-effekten i innsnevring), men i sum fremkommer et tilsynelatende kaotisk vindfelt.

Noen områder i Figur 5.2 er av særlig interesse: For meteorologisk vind fra sør-sørvest, som er tilfellet her (jfr. seksjon 3.4), er utslippet fra tunnelåpningen sør for Kværnerbyen, altså ut fra nordgående løp av Operatunnelen, av størst interesse. Strømlinjene i Figur 5.2 rett øst for denne åpningen viser at middelvinden går i østlig og sørøstlig retning i dette området. Merk at dette er en ganske annen retning enn den *globale* (meteorologiske) vindretningen. Man kan derfor forvente at et utslipp fra Operatunnelen vil spres noe sør-sørøstover i tillegg til i hovedretningen, altså nord-nordøstover.

Inne i selve Kværnerbyen finnes et typisk urbant vindfelt med mange sammensatte strukturer og stor variasjon i vindretning. En rimelig konsekvens av dette når det gjelder spredning er en utblanding og fortykning av konsentrasjonen i dette området.

Et siste fenomen verdt å bemerke er bare delvis synlig i Figur 5.2; Ekebergåsen sør for Kværnerbyen fører til en betydelig storskala-avbøyning av vinden rundt åsen<sup>10</sup>. En effekt av dette er østgående vind innover i Lodalen. Det er denne vinden som mest sannsynlig bidrar til at vinden sør for jernbanegarasjen (det lange bygget vist delvis i venstre kant av figuren) er mer østgående enn vinden nord for dette bygget. Det er grunn til å tro at denne avbøyningen av vind rundt Ekebergåsen vil medføre vind inn mot Kværnerbyen østfra for et stort spenn globale vindretninger – kanskje helt fra sørøstlig til vestlig vind. Dette undersøkes noe nærmere i delproblemstilling B (se seksjon 6.2).

Vindfeltene fra simulering II og IIb vises ikke, da de er meget like det som vises i Figur 5.2, med unntak av lokale forskjeller nær endret geometri.

Middelvinden påvirker i stor grad i hvilken hovedretning og hvor raskt forurensningen fra en gitt kilde sprer seg. For å si noe om utblandingen, eller *diffusjonen*, av forurensningen – altså hvor fort og hvor mye konsentrasjonen tynnes ut – kan det være nyttig å se på turbulensen i vindfeltet. Mer turbulens, altså større variasjon i vindhastigheten, gir mer utblanding. Dette medfører igjen at middelkonsentrasjonsverdiene synker, men at forurensningen til gjengjeld spres over et større område.

Figur 5.3 viser turbulent kinetisk energi (TKE), som er ett av flere mål på turbulens, fra simulering I. (Simulering II og IIb ga lignende resultater og vises ikke.)

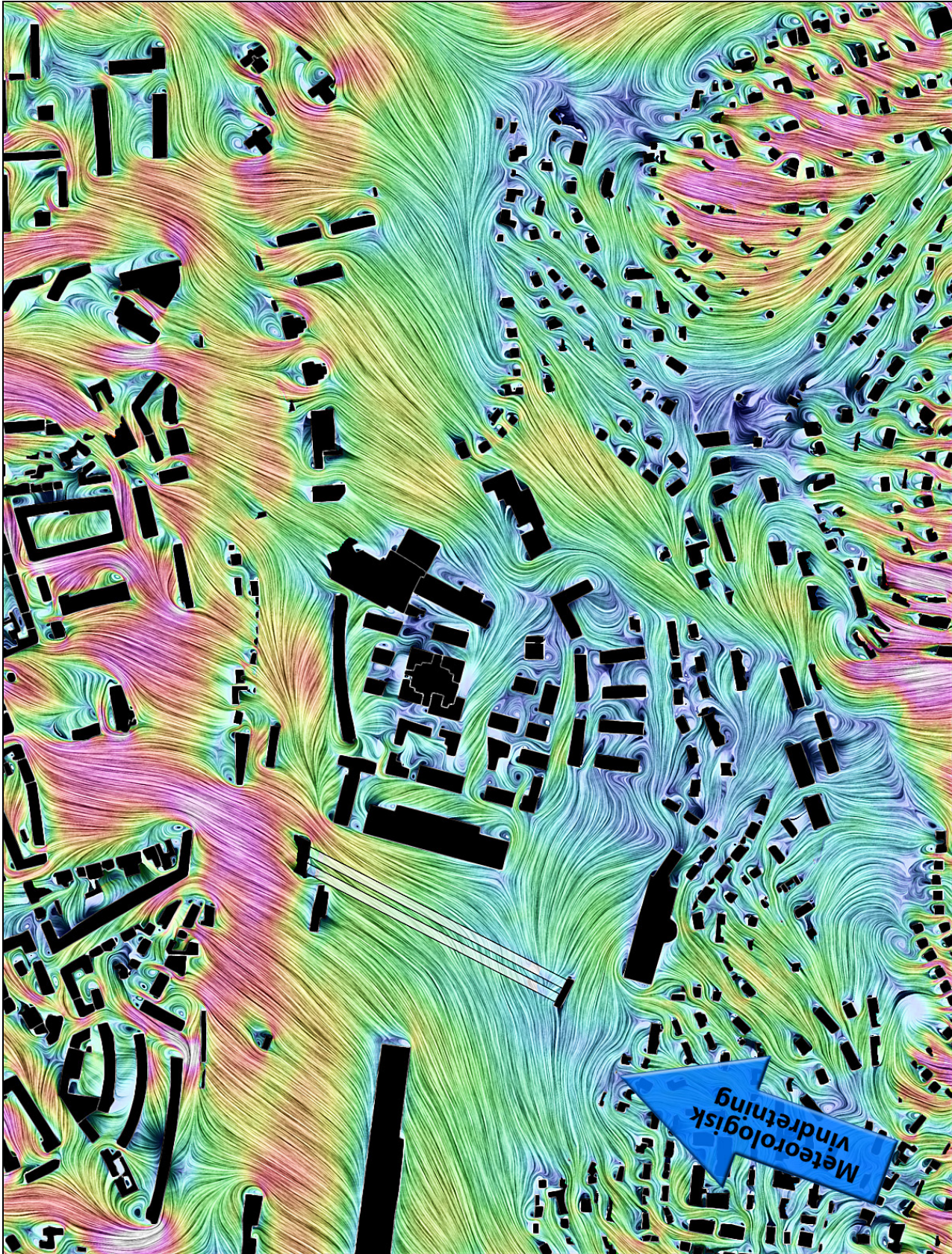
Konsentrasjonen utblandes mer effektivt ved høyere TKE. Derfor kan det forventes at spredningsområdet fra en forurensningskilde vil spres mer ut i områder med høy TKE, som for eksempel rett øst for bebyggelsen i Kværnerbyen.

Videre fremgår det fra Figur 5.3 at det er høye turbulensnivåer nord for Lodalen. Den gjennomsnittelige vindhastigheten er imidlertid også relevant; der vinden typisk frakter forurensningen raskt videre, vil ikke den turbulente diffusjonen ha like mye tid til å blande ut forurensningen.

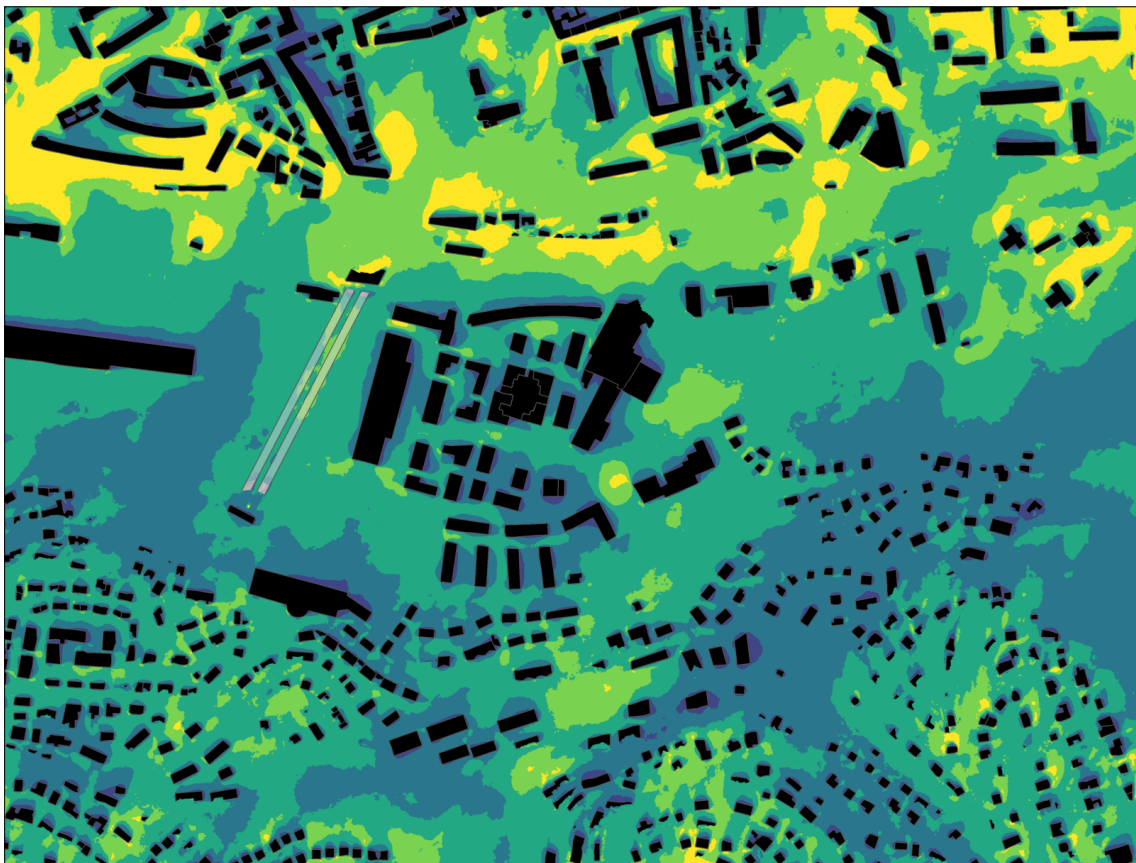
Hvis man ser på Figur 5.2 og 5.3 i sammenheng, er det tydelig at det som regel er mer turbulens der vindhastigheten er høy. Den *turbulente intensiteten*, et mål på turbulens relativt til gjennomsnittsvind,

---

<sup>10</sup>Dette vil også gjelde for andre globale vindretninger enn den som er benyttet i denne eksempelstudien.



Figur 5.2 Gjennomsnittsvind i simulering 1, illustrert med en kombinasjon av vindstyrke og vindretning i en flate 3 m over bakken. Vindstyrke er illustrert med fargede områder, der mørk blå tilsvarer svakest vind ( $\approx 0$  m/s) og lilla tilsvarer sterkere vind ( $> 2$  m/s). Vindretning er vist vha. linjeintegral-konvolusjon (Cabral og Leedom, 1993); vinden blåser langs de skraverete linjene. Den meteorologiske vinden er illustrert med blå pil nederst i venstre hjørne.



*Figur 5.3* Turbulent kinetisk energi i simulering I i en flate 3 m over bakken. Turbulensnivåer fra 0 m/s (farget mørkeblå) til 0.4 m/s (farget gule) vises, med lineær endring mellom hvert fargenivå.

---

---

er derfor relevant. Denne kan forventes å være høy f. eks. i “sentrum” av Kværnerbyen, der vinden er svak i kombinasjon med en del turbulens. Netto utblanding av forurensning kan derfor forventes å være relativt høy her. Dette samsvarer med diskusjonen av strømlinjene for middelvinden i dette området, diskutert tidligere.

### **5.2.1 Hastighetsfeltets betydning for spredning og mulige tiltak**

I lys av det overnevnte kan det trekkes noen konklusjoner om tiltak for å redusere spredning fra Operatunnelen, gitt den globale vindretningen som er brukt i simuleringene. En skjermende vegg, slik som den illustrert i Figur 3.2, vil neppe ha en betydelig effekt. Dette skyldes flere forhold, men to hovedårsaker kan nevnes.

For det første er turbulensen betydelig i området nær tunnelåpningen og veggen, hvilket bidrar til effektiv utblanding av den forurensede luften. Følgelig vil skyen av forurenset luft raskt vokse seg såpass stor at skjermingsveggen vil være av ubetydelig størrelse i forhold.

I kombinasjon med den øst- og sørøstgående gjennomsnittsvinden ved tunnelåpningen fører dette til at forurenset luft sannsynligvis vil trekke inn mot både Kværnerbyen og sågar sørover inn mot Ekebergskrenten, der den vil fortsette å blandes ut mens den spres nord-nordøstover igjen.

En tunnelforlengelse, slik som den illustrert i Figur 5.1, vil derimot trolig ha en betydelig lokal effekt i Kværnerbyen. Dersom utslippet flyttes 140 m nordover, er middelvinden ikke lenger sørøstgående, og det kan forventes at mye av forurensningen vil transporteres nord-nordøstover før den utblandes altfor mye.

For spredning fra Vålerengtunnelen er det nærliggende å tro at den forurensede luften ganske raskt vil spres direkte nord-nordøstover, muligens med noe spredning innover den nordligste delen av Kværnerbyen på grunn av lokale vindforhold i kombinasjon med turbulent utblanding. Ettersom turbulensnivåene er høye i området rundt tunnelåpningen, kan det forventes at luftskyen raskt spres på tvers av vindretningen og deretter tynnes ut. Ingen tiltak rundt Vålerengtunnelen er derfor nødvendige med tanke på luftkvalitet i Kværnerbyen (for den globale vindretningen som antas i denne eksempelstudien).

## **5.3 Spredning**

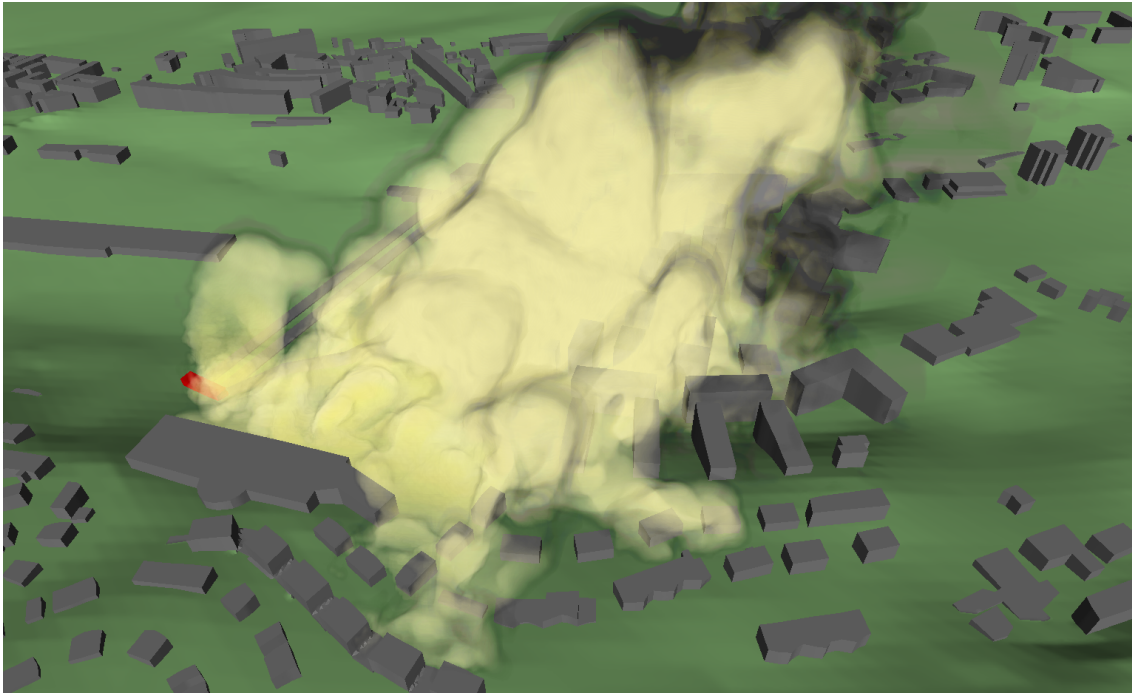
Før resultatene av spredningsberegningene drøftes er det verdt å minne om antakelsene skissert i seksjon 3.5. Selv om spredningskonturene som vises i figurene nedenfor gir nøyaktig avgrensede konsentrasjonsområder, er de basert på et statistisk stasjonært og forenklet vær. Derfor er resultatenes tilsynelatende presisjon noe mindre representative for virkeligheten enn de kan se ut. Sensitiviteten til variabelt vær kan imidlertid estimeres ved behov, og variabelt vær er mulig å inkludere i beregningene. Gitt de antakelsene som er antatt i denne eksempelstudien er imidlertid resultatene som drøftes her rimelig pålitelige.

Kompleksiteten i en turbulent strømning medfører at det er statistiske data som er mest relevante for analyser av spredning. Et tredimensjonalt stillbilde av spredningen fra Operatunnelen er likevel vist

---

---

i Figur 5.4 for å illustrere denne kompleksiteten. Turbulente strukturer (i form av “røykbobler”) er tydelige i figuren og indikerer til en viss grad også spennet i romlige skalaer i problemet. Ved et annet tidspunkt ville skyen i figuren sett annerledes ut, på grunn av turbulente fluktuasjoner i vindfeltet. Ut fra bildet i figuren er det likevel grunn til å tro at hoveddelen av spredningen vil være nordover og østover, dog med en tydelig tilbakestrømning sørover lokalt, rett øst for tunnelåpningen.



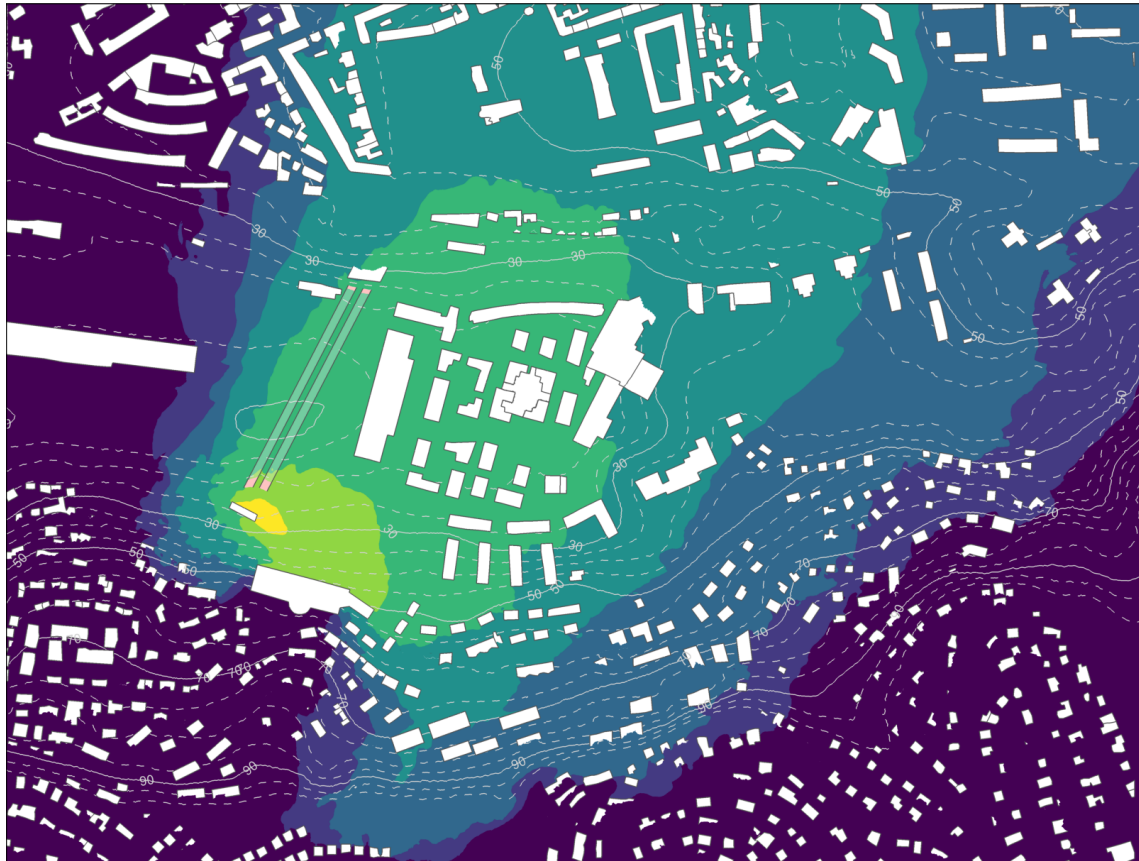
*Figur 5.4 Et stillbilde av forurensningsspredning fra Operatunnelen (markert i rødt). Merk at synligheten til forurensningen ikke er lik hva som ville vært synlig i virkeligheten.*

Når det gjelder statistikk er (tids-)middelkonsentrasjonen ofte det mest intuitive målet på “typiske” konsentrasjoner i et punkt. Figur 5.5 viser middelkonsentrasjonsfeltene for utslipp fra Operatunnelen i simulering I i en flate 3 m over bakken. Dette er representativt for konsentrasjonen i hodehøyde.

Som forventet ut fra middelvindfeltet (jfr. seksjon 5.2.1), forekommer det en betydelig tilbakestrømning sørover av forurenset luft øst for tunnelåpningen. Forurenset luft spres faktisk helt inn mot skrenten av Ekebergåsen, over 300 m sør for kilden. Forøvrig foregår spredningen i hovedsak øst- og nordover. Dette er overordnet i tråd med den meteorologiske vindretningen (se Figur 5.2), men lokalt i Lodalen er spredningen mer østgående på grunn av den tidligere nevnte avbøyningen av vind rundt Ekebergåsen.

Konsentrasjonsverdiene synker generelt rimelig raskt med avstand fra kilden; i Kværnerbyen er typiske konsentrasjoner mellom 0.01 % og 0.1 % av kildekonsentrasjonen. Dersom kildekonsentrasjonen er høy og/eller eksponeringstiden lang kan dette likevel være kritiske verdier sett fra et helseperspektiv. I nordøstlig retning er konsentrasjonsverdiene høye over lengre avstander, som forventet. For store deler av Vålerenga, over 600 m fra kilden, er konsentrasjonsverdiene fortsatt mellom 0.001 % og 0.01 % av kildekonsentrasjonen.

Fra Figur 5.5 er det tydelig at transversal spredning (spredning på tvers av vindretningen) også er



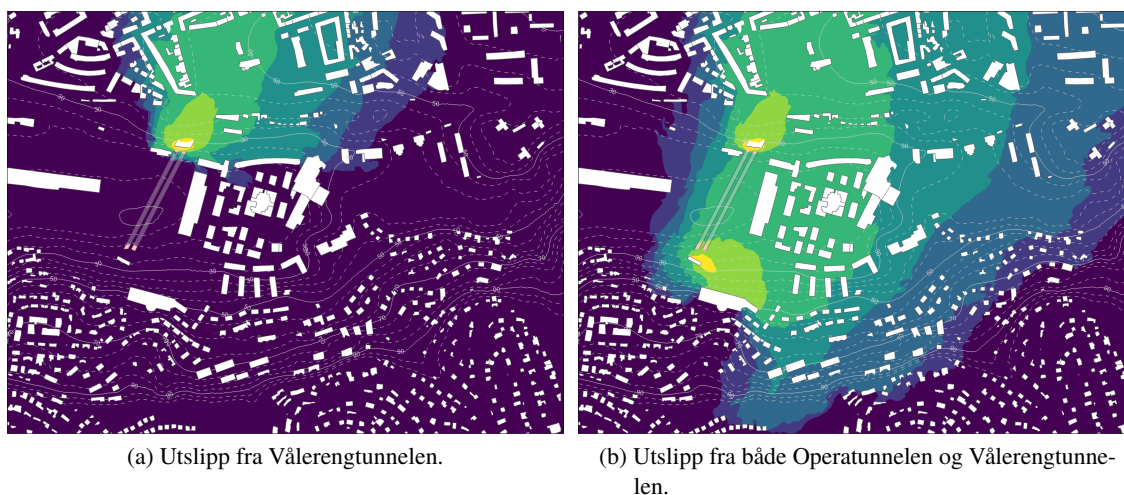
Figur 5.5 Relativ middelkonsentrasjon (i forhold til kildekonsentrasjonen) for utslipp fra Operatunnelen i en flate 3 m over bakken; simulering I. Konsentrasjonsnivåer fra  $< 10^{-5}$  % (farget mørkeblått) til  $> 1$  % (farget gult) vises, med en faktor 10 i endring mellom hvert fargenivå. Høydekoter er vist som grå linjer.

betydelig, som ofte er tilfellet under turbulente forhold. Relativ til den meteorologiske vindretningen er bredden på skyen av forurenset luft nedstrøms tunnelåpningen mer enn 600 m.

Merk at foregående diskusjon antar all tilstedeværelse av forurenset luft (alle konsentrasjoner  $> 10^{-5}$  % av kildekonsentrasjonen) som “forurenset”. Dette er ikke nødvendigvis tilfellet. Dersom den kritiske grensen for helsepåvirkning for eksempel hadde vært 0.01 % av kildekonsentrasjonen (for en gitt, kjent kilde), ville Vålerenga ikke blitt regnet som påvirket, og det ville ikke blitt registrert noen tilbakestrømning sørover (mot Ekebergskrenten) av betydning. Bredden på skyen ville også blitt redusert til  $\approx 400$  m på det bredeste.

*Kildekonsentrasjonen og den kritiske grensen for helsemessig akseptable konsentrasjoner er altså avgjørende for tolkningen av simuleringsresultatene. Disse dataene er ikke innhentet i denne eksempelstudien, men påvirker ikke simuleringene av selve spredningen.*

I tillegg til utslippet fra Operatunnelen er et utslipp fra Vålerengtunnelen simulert. Middelskonsentrasjonene fra dette utslippet, samt den summerte konsentrasjonen dersom man inkluderer både Operatunnelen og Vålerengtunnelen, vises i Figur 5.6.



*Figur 5.6 Relative middelskonsentrasjoner (i forhold til kildekonsentrasjonen) i en flate 3 m over bakken; simulering I. Konsentrasjonsnivåer fra  $< 10^{-5}$  % (farget mørkeblått) til  $> 1$  % (farget gult) vises, med en faktor 10 i endring mellom hvert fargenivå. Høydekoter er vist som grå linjer.*

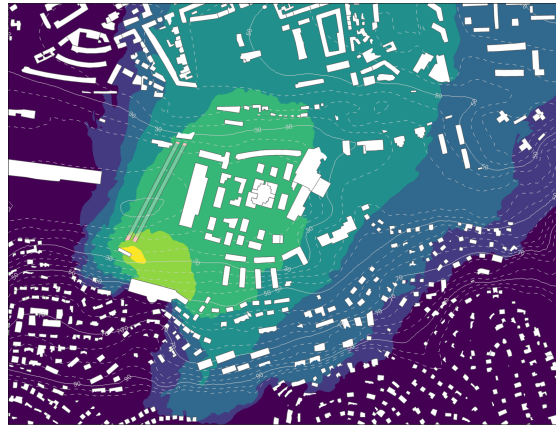
Som forventet (jfr. seksjon 5.2.1) drar det meste av forurensningen fra Vålerengtunnelen nord-nordøstover med den meteorologiske vindretningen antatt her. En marginal mengde trekker ned mot og inn i nordre del av Kværnerbyen, men det store bygget nord i Kværnerbyen (Turbinveien 6–18) er både langt og høyt nok til å blokkere mye av forurensningen.

Summen av utslippene fra begge tunnelåpningene gir noe økt konsentrasjon på Vålerenga (og kanskje lenger nord), men for Kværnerbyen er det utslippet fra Operatunnelen som er viktig (for gjeldende meteorologiske vindretning). I det følgende vil kun dette utslippet bli diskutert.

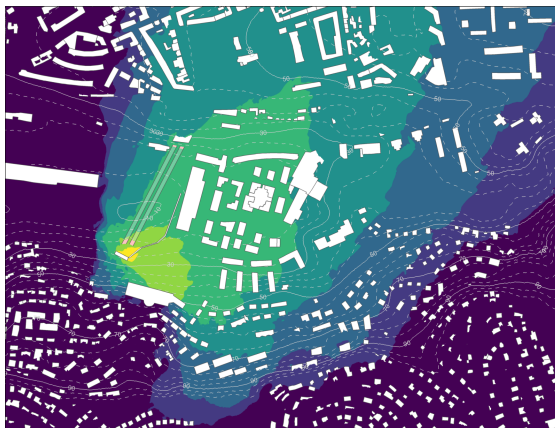
CFD-metodikken er godt egnet til å se på lokale tiltak for å hindre lokal luftforurensning fra punktkilder. Simulering II og IIb er beregnet på samme måte som simulering I, men geometrien



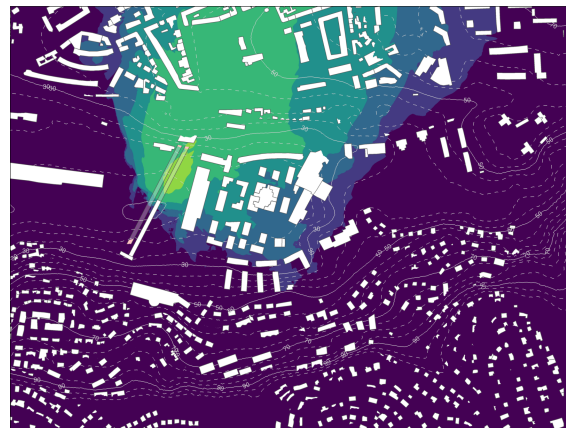
er endret, som beskrevet i seksjon 5.1. Figur 5.7 viser middelkonsentrasjoner for utslippene i simulering I, II og IIb.



(a) Simulering I.



(b) Simulering II.



(c) Simulering IIb.

*Figur 5.7 Relative middelkonsentrasjoner (i forhold til kildekonsentrasjonen) for utslipp fra Operatunnelen i en flate 3 m over bakken. Konsentrasjonsnivåer fra  $< 10^{-5}$  % (farget mørkeblått) til  $> 1$  % (farget gult) vises, med en faktor 10 i endring mellom hvert fargenivå. Høydekoter er vist som grå linjer.*

Som nevnt tidligere – og forventet ut fra hastighetsfeltet og turbulensen – har den skjermende veggen så å si ingen effekt. Den effektive utblandingen av forurensning kombinert med de lokale vindforholdene på utslippspunktet medfører at den skjermende veggen blir for lav til å påvirke spredningen nevneverdig.

Derimot viser Figur 5.7c at tunnelforlengelsen av Operatunnelen påvirker luftkvaliteten i Kværnerbyen dramatisk for global vind fra sør-sørvest; typisk synker konsentrasjonsverdiene ned mot mellom 0 % og 0.01 %, altså minst en faktor 10 mindre enn uten tunnelforlengelsen. Store deler av Lodalen (inkludert området ved Ekebergskrenten) får helt ren luft.

I tillegg vil maksimumskonsentrasjonen en fotgjenger kan oppleve reduseres med tunnelforlengelsen fordi utslippet forekommer midt på E18-broen gjennom Lodalen. Denne broen er høyere opp og

---

---

lengre unna fotgjengerområder enn den opprinnelige tunnelåpningen, slik at forurensingen rekker å tynnes mer ut før den når disse områdene.

Ulempene med tunnelforlengelsen er at områdene nord for Lodalen vil få noe høyere konsentrasjoner i noe større omfang. Maksimumskonsentrasjonene vil likevel være lavere for disse områdene enn det de var i Kværnerbyen uten tunnelforlengelse. For å trekke en endelig konklusjon om total helseeffekt, kan konsentrasjonsfeltene fra simulering I og IIb kombineres med lokal befolkningstetthet (enten med dedikerte beregninger eller i kommersiell kartdata-programvare, som ESRI's ArcGIS) for å estimere forventet netto eksponering.

Selv om *middel*konsentrasjonene er lave i et gitt område, kan kortvarige fluktusjoner gi midlertidig meget høye konsentrasjoner. Dette er mindre viktig for NO<sub>x</sub> og sotpartikler typiske for forurensning fra trafikk og vedfyring, men når det gjelder for eksempel industrikjemikalier kan slike forbigående konsentrasjonsøkninger være kritiske for liv og helse.

Figur 5.8 viser gjennomsnittlige fluktusjoner (altså den statistiske variasjonen) i konsentrasjon over tid relativt til den gjennomsnittlige konsentrasjonsverdien i samme posisjon for simulering I. Enkelte steder er *gjennomsnitt*fluktusjonene mer enn 8 ganger så høye som middelverdien. I Kværnerbyen og omegn er middelkonsentrasjonen typisk mellom 0.01 % og 0.1 % (jfr. Figur 5.5), mens gjennomsnittfluktusjonene er mellom 0.5 til 2 ganger dette. Det vil si at forbigående konsentrasjonsnivåer på mellom 0.2 % og 0.4 % ikke er usannsynlig<sup>11</sup>.

Hittil har konsentrasjonsverdier 3 m over bakken blitt diskutert. Dette er representativt også for konsentrasjonen i hodehøyde eller på bakken, der fotgjengere og andre oftest oppholder seg. Den vertikale spredningen av forurensning kan imidlertid også være av interesse, f. eks. mtp. luftinntak på toppen av høye bygg. Figur 5.9 gir et innblikk i hvordan konsentrasjonen varierer med høyde for tre ulike posisjoner.

Kort fortalt viser Figur 5.9 at høydevariasjonen generelt er liten; det er langt større forskjell i konsentrasjonen mellom de tre (horisontale) posisjonene enn for ulike høyder på samme sted. Dette er enda en indikasjon på den kraftige utblandingen av forurenset luft (som i sin tur i stor grad skyldes turbulens). Opp til 20 meter over bakken er det intet gjennomgående mønster i konsentrasjonsprofilene, men fra 20 meter og oppover er konsentrasjonen generelt avtagende.

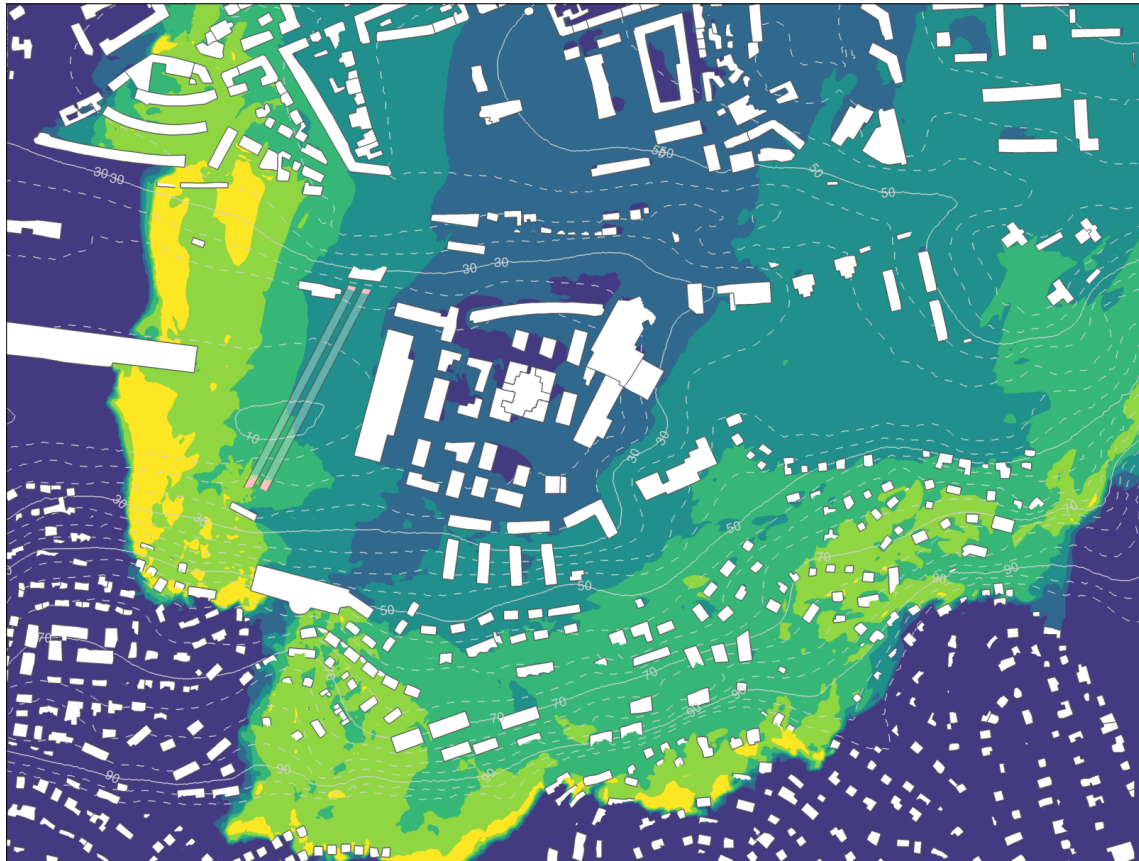
### 5.3.1 Konsentrasjon og eksponering langs en rute

Som et siste eksempel på bruk av spredningssimuleringer, kan konsentrasjoner langs en gitt rute hentes fra beregningene for å estimere eksponering.

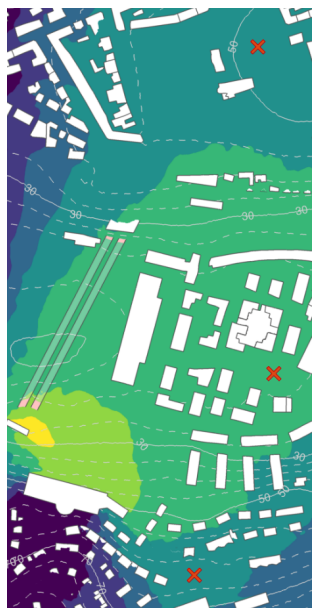
Figur 5.10a viser en tenkt rute for en fotgjenger som går fra Lodalen bussholdeplass i vest til Kværnerdalen barnehage i øst. Figur 5.10b og Figur 5.10c viser middelkonsentrasjonsverdiene langs denne ruten som en funksjon av hvor langt fotgjengeren har beveget seg. Det er et tydelig maksimum i konsentrasjon litt over 300 meter fra bussholdeplassen. Ikke overraskende korresponderer dette området til den delen av gangveien som går rett forbi tunnelmunningen. Det er også tydelig fra figuren hvor mye høyere konsentrasjonen er i dette området i forhold til områder bare litt lenger unna forurensningskilden.

---

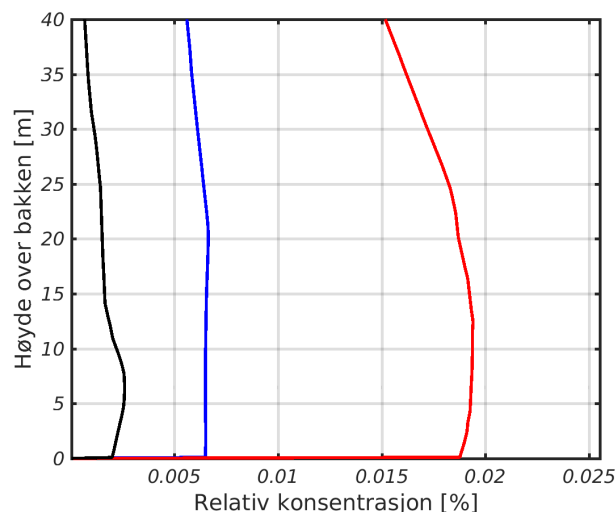
<sup>11</sup> Dette estimatet bygger på en antagelse om normalfordeling. En betafordeling kan være mer realistisk og gir tilsvarende eller høyere sannsynlighet for store fluktusjoner.



*Figur 5.8* Relative konsentrasjonsfluktasjoner (i forhold til middelkonsentrasjon i samme punkt) for utlipp fra Operatunnelen i en flate 3 m over bakken; simulering I. Relative konsentrasjonsfluktasjoner fra  $< 0.5$  (farget mørkeblått) til  $> 8$  (farget gult) vises, med en faktor 2 i endring mellom hvert fargenivå. Høydekoter er vist som grå linjer.



(a) Røde kryss markerer punkt Nord, Senter og Sør ut fra kartplassering.



(b) Konsentrasjonene for punkt Nord (blå kurve), Senter (rød kurve) og Sør (svart kurve).

Figur 5.9 Relativ middelkonsentrasjon (i forhold til kildekonsentrasjonen) fra simulering I som funksjon av høyde over bakken for utslipp fra Operatunnelen.

Det kan gjøres noen antakelser om en “gjennomsnittlig” fotgjenger. Anta for eksempel en ganghastighet på 5 km/t, altså 1.4 m/s, og et respirasjonsvolum på 12 l/min. En totaldose kan da beregnes relativ til kildestyrken ved å akkumulere middelkonsentrasjonene langs ruten. Totaldosen tilsvarer den mengden forurensning fotgjengeren typisk kan forventes å få i seg når hen går ruten vist i Figur 5.10a under gjeldende værforhold.

For en kildestyrke på  $m_{\text{forurensning}}$  mg/s, altså at  $m_{\text{forurensning}}$  mg med f. eks. NOx kommer ut av tunnelåpningen pr. sekund, viser simuleringsdataene at fotgjengeren får i seg  $1.23 \cdot m_{\text{forurensning}}$  mg NOx totalt fra denne forurensningskilden.

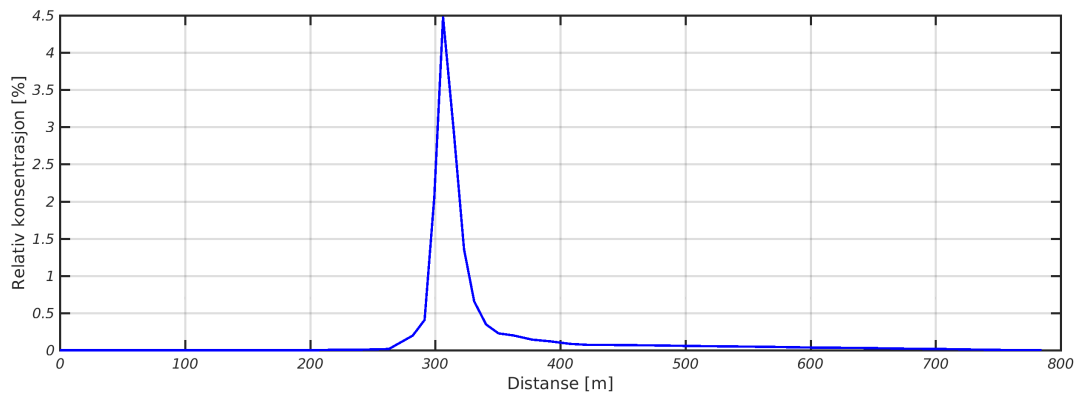
### 5.3.2 Konklusjoner

Det atmosfæriske grensesjiktet er meget turbulent, og tilstedeværelsen av topografi og bygningsmasse forsterker turbulensen ytterligere. I resultatene som er gjengitt i denne rapporten gir turbulensen seg utslag blant annet som kraftig utblanding av luften. Dette medfører igjen at lokale variasjoner i konsentrasjon effektivt “smøres ut”.

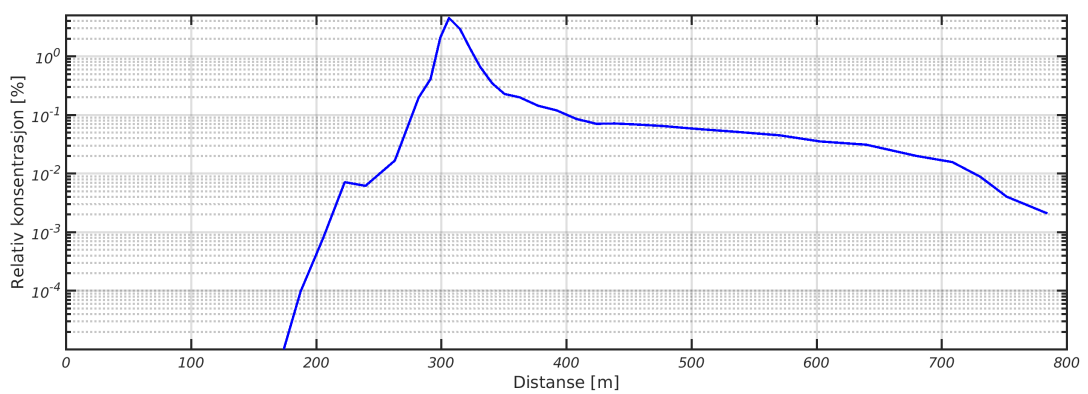
Det er den effektive utblandningen, forårsaket av sterk turbulens, som i hovedsak forklarer både den raske reduksjonen i middelkonsentrasjon vekk fra kilden (ned mot mindre enn 0.1 % i løpet av de nærmeste 100 m), den store spredningen av konsentrasjonsskyen (inkludert på tvers av middelvindretningen), og den neglisjerbare effekten av skjermingsveggen i simulering II.



(a) Fotgjengerens rute, fra vest til øst.



(b) Konsentrasjonsverdier som funksjon av distanse langs ruten.



(c) Konsentrasjonsverdier som funksjon av distanse langs ruten, tegnet med en logaritmisk vertikal-akse.

Figur 5.10 Middelskonsentrasjoner langs en tenkt rute for utslipp fra Operatunnelen i simulering I.

---

---

En god utblanding betyr også at forurensning over lang tid, store avstander og fra mange kilder er små geometriske detaljer (dvs. bygningsmasse) generelt mindre viktig og kan neglisjeres<sup>12</sup>. For kortvarige eller høyintense enkeltkilder, som f. eks. tunnelmunninger, kan lokale forhold derimot spille en rolle. Merk også at større geometriske trekk, slik som Ekebergåsen eller annen topografi, kan være viktige. Disse fanges ofte ikke opp i tilstrekkelig grad i grovt oppløste modeller, og man kan da miste dynamiske effekter som spiller inn på større skalaer – vinden inn i Lodalen i denne eksempelstudien kan være et eksempel på en slik effekt.

Mens leveggen i simulering II hadde ubetydelig effekt på spredningen, har tunnelforlengelsen i simulering IIb stor effekt fordi forurensningen føres forbi resirkulasjonen bak Ekebergåsen før den slippes ut i luften. Forurensningen blandes og transporteres derfor mindre innover i dalen.

Det bør gjentas at den faktiske kildekonsentrasjonen og den kritiske grensen for helsemessig akseptable konsentrasjoner er avgjørende for tolkningen av simuleringsresultatene. I et konsekvensmodellerings-perspektiv kan da konsentrasjonsfeltene kombineres med lokal befolkningstetthet for å estimere forventet netto eksponering og derved en netto estimert effekt på folkehelse for ulike tiltak.

---

<sup>12</sup>Merk at dette ikke betyr at den akkumulerte effekten av alle bygg kan sees bort fra; enkeltdetaljene er irrelevante, men den dynamiske effekten av det urbane miljøet som helhet er ikke uviktig.

---

---

## 6 Problemstillingens del B

### 6.1 Konseptuelt forslag

Vindroser er et nyttig verktøy for å visualisere hvor ofte vinden kommer fra ulike himmelretninger i et gitt punkt. I urbane områder er imidlertid en vindrose målt og beregnet for et enkelt punkt ikke nødvendigvis særlig representativt for andre nærliggende punkter, grunnet geometrieffektene diskutert i seksjon 5.2. I del B av denne eksempelstudien skal derfor en mulig metodikk for å beregne lokale vindroser illustreres.

Det finnes flere måter å beregne lokale vindroser på. Manglene og mulige forbedringer ved metoden som benyttes her diskuteres i Tillegg B til slutt i denne rapporten. Kort fortalt benyttes følgende prosedyre i denne eksempelstudien:

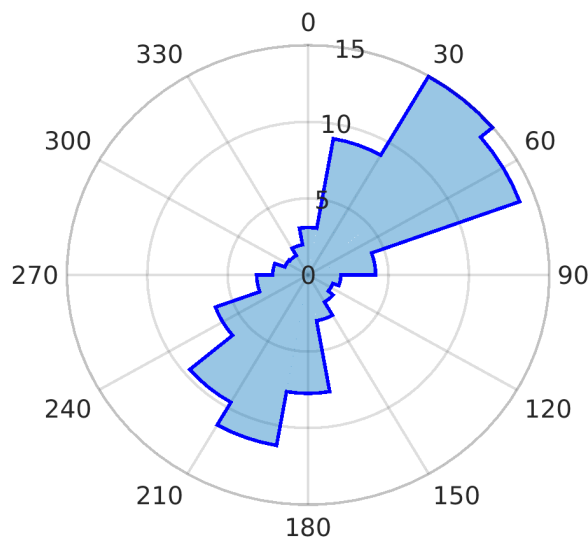
1. En meteorologisk eller *global* vindrose brukes som utgangspunkt. Denne vindrosen er basert på én eller flere meteorologiske målestasjoner i egnede posisjoner og høyder eller data fra meteorologiske storskala-simuleringer.
2. Hver hovedretning i den globale vindrosen korresponderer til en “urban CFD”-simulering av lokal vind der innkommende meteorologisk vind tilsvarer vinden fra vindrosen. Dette betyr altså at et datasett bestående av mange forskjellige CFD-simuleringer er nødvendig. I denne eksempelstudien består vindrosen av 18 hovedretninger med hver sine tilhørende simuleringsdata.
3. For hver hovedretning i den globale vindrosen henter man den korresponderende CFD-simuleringen og leser av vindretningen i et valgt punkt. Den relative forekomsten fra den globale vindrosen legges til den hovedretningen i den lokale vindrosen som tilsvarer den lokale vindretningen som er avlest. Etter å ha gjort dette for hver hovedretning i den globale vindrosen (og altså gått gjennom alle simuleringsdataene), er den lokale vindrosen summert opp og ferdig beregnet.

Som nevnt i rapportens del 1 (se seksjon 3.1.2) er resultatene i denne delen basert på data fra tidligere utførte vindberegninger for Oslo (Fossum og Helgeland, 2017), der data for alle 18 vindretninger foreligger. Eksemplene i 6.2 gis for å illustrere mulighetene. I likhet med problemstillingens del B antas isoterme forhold og tørr luft.

### 6.2 Lokale vindroser

Figur 6.1 viser den globale vindrosen som benyttes. I denne eksempelstudien er dette en vindrose som tilsvarer gjennomsnittet av tre målestasjoner i Oslo (Blindern, Hovin og Alna)<sup>13</sup>. Fra figuren kan det leses at de dominerende vindretningene for Oslo er vind fra omtrent nordøst (altså vind fra 40° og 60° i vindrosen) og omtrent sør-sørvest (altså vind fra 200° i vindrosen). Tilsammen kommer det vind fra disse himmelretningene 40 % av tiden i Oslo, som skyldes sterke topografieffekter (blant annet orienteringen av Groruddalen og Oslofjorden).

<sup>13</sup>Vinddata fra målestasjonene er hentet via eKlima, en tjeneste fra met.no, se <http://eklima.met.no/>



Figur 6.1 Den globale vindrosen for Oslo som benyttes i problemstillingens del B.

Siden data fra tidligere simuleringer benyttes er ikke beregningsområdet lenger begrenset til området rundt Kværnerbyen. Det er likevel interessant å velge noen punkter i eller nær Kværnerbyen i denne eksempelstudien. I tillegg er det valgt en del andre illustrerende posisjoner i Oslo. De seks posisjonene som er valgt ut for beregning av lokale vindrosener er markert i Figur 6.2. De lokale vindrosene for disse posisjonene er vist i Figur 6.3.

Figur 6.3 illustrerer tydelig de store lokale forskjellene i Oslo når det gjelder typiske vindretninger. I enkelte tilfeller finnes åpenbare forklaringer på de lokale vindrosene, mens for andre steder er det vanskelig å peke på en underliggende årsak.

Den lokale vindrosen i figur 6.3a er identisk med den globale. Dette er forventet, ettersom det geografiske punktet ligger godt ute i fjorden, der det hverken finnes bygninger eller topografi i nærheten.

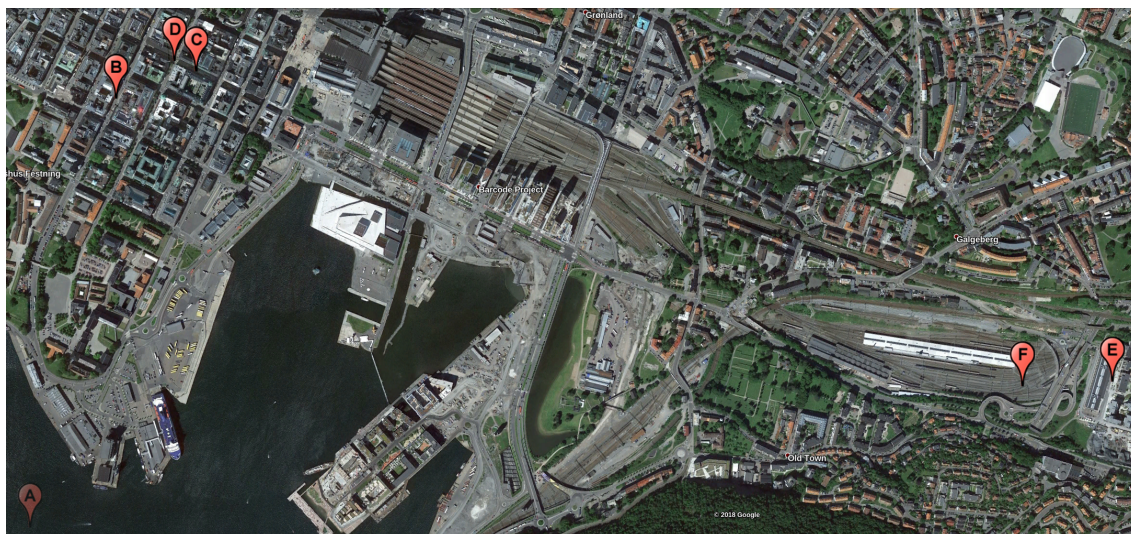
Figur 6.3b er også rimelig intuitiv; dersom man sammenligner de lokalt dominerende vindretningene (NNØ og SSV) vil man se at disse sammenfaller med gateløpets retning. Vinden i denne posisjonen er derfor sterkt dominert av kanaliseringseffekten av gateløpet gjennom Kongens gate, noe som kan forventes i lange gater mellom høye bygg.

Også i Figur 6.3c finnes tydelige indikasjoner på kanalisering av vinden. Her er imidlertid effekten mindre enn for gateløpet i Kongens gate, som blant annet skyldes at den globale vinden sjeldnere kommer fra himmelretninger som sammenfaller med Prinsens gate.

Figur 6.3d er interessant fordi den tar for seg et kryss mellom to fremtredende gateløp. Her er det vanskelig å si hvilken kanaliseringsretning som dominerer, men kombinasjonen av bygeometrien og den globale vindrosen gir en tendens til vind i nord-sør-retning.

Vindrosen i Figur 6.3e er meget vanskelig å forutsi uten simuleringer; det er bemerkelsesverdig at det aldri vil komme (middel-)vind fra noen nordlig retning i dette punktet, selv om den globale





Figur 6.2 Posisjoner der lokale vindroser (se Figur 6.3) er beregnet. Merk at posisjon A er langt utenfor figuren (omtrent midt mellom nordspissen av Nesoddtangen og sørspissen av Bygdøy) og er derfor vist delvis gjennomsiktig nederst i venstre hjørne av kartet.

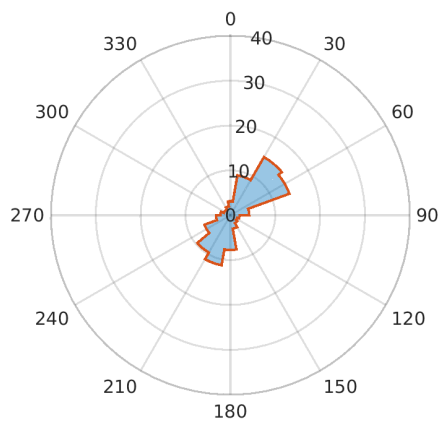
vinden oftest kommer fra nordøst. Noe av grunnen er sannsynligvis bygningen ved nordenden av Smeltedigelen; dette bygget vil blokkere mye av vinden nordfra, mens global vind østfra (inkludert nordøstfra) istedet kan kanaliseres inn via Turbinveien (omtrent midt i Smeltedigelen, på østre side). Den lokale vinden fra Turbinveien vil kunne blåse sørover i sørlige del av Smeltedigelen, mens den vil blåse nordover i nordlige del av gateløpet, der vindrosen i Figur 6.3e er beregnet. Den lokale vindrosen i Smeltedigen skyldes dog ikke kun bygningsmassen i området. Også Ekebergåsen i sør og Galgeberg/Vålerenga i nord bidrar til vindforholdene i Lodalen.

Den siste vindrosen, vist i Figur 6.3f, gjelder også for Lodalen. Dette er et mer åpent område, der man kan forvente at topografien spiller større rolle enn bygningsmassen. I motsetning til vindrosen i Smeltedigelen, har den lokale vindrosen i Figur 6.3f en tydelig nordøstlig komponent – faktisk mer dominerende enn i den globale vindrosen.

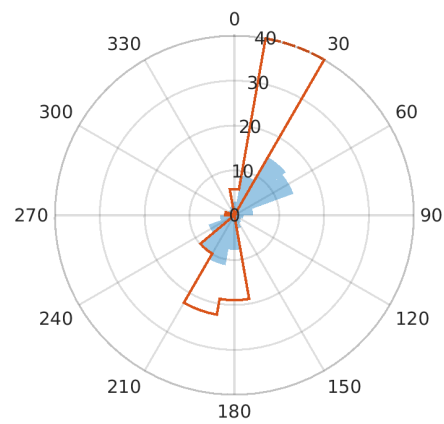
Det er viktig å tolke vindrosene riktig; rosene sier *ikke* hvor *sterk* vinden er fra de ulike retningene, men de viser hvor *ofte* vinden kommer fra ulike retninger. Informasjon om vindstyrke kan i prinsippet også beregnes (jfr. Tillegg B), men dette er utenfor eksempelstudiets ramme.

## 6.3 Konklusjoner

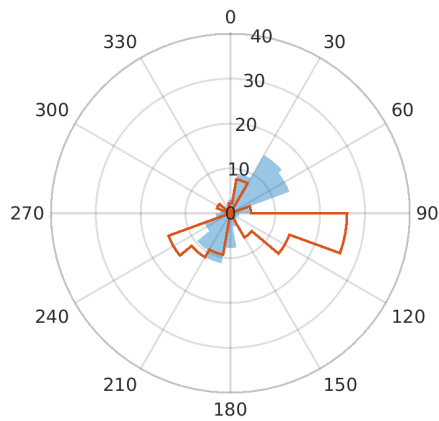
Som forventet er den globale vindrosen ofte lite representativ for forskjellige lokale punkter i et urbant område. Lokale forhold som bygninger og topografi kan føre til et sammensatt vindfelt bestående av ulike vindfenomener, som beskrevet i seksjon 5.2. For et vilkårlig punkt kan det være vanskelig å forutse vind uten å gjennomføre simuleringer.



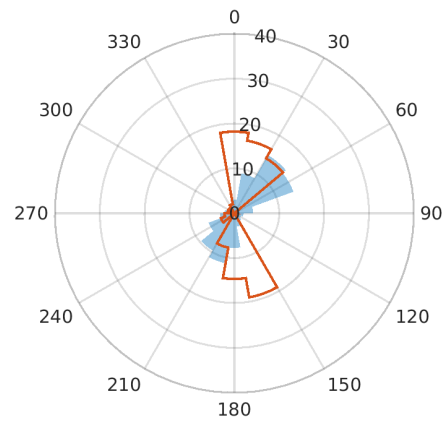
(a) Oslofjorden



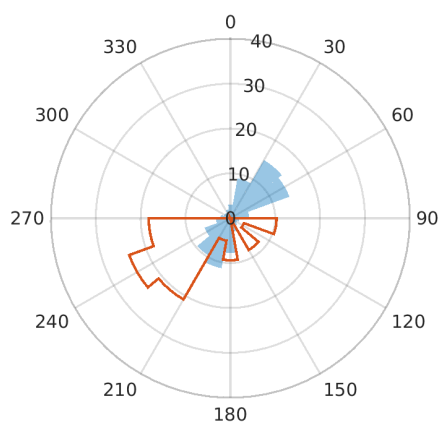
(b) Gateløp retning mot NNØ, Kongens gate



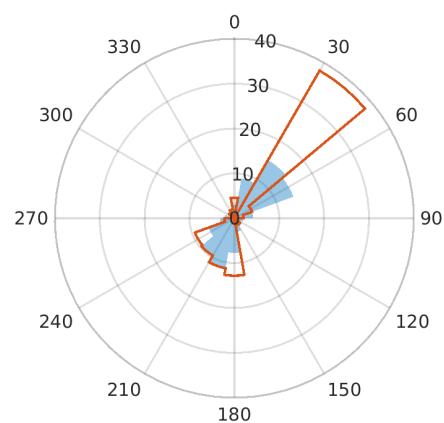
(c) Gateløp retning mot VNV, Prinsens gate



(d) Gatekryss, Prinsens gate/Kirkegata



(e) Gateløp, Smeltedigelen i Kværnerbyen



(f) Åpen plass i Lodalen, NV for tunnelåpning

Figur 6.3 Lokale vindroser for utvalgte punkter i Oslo, jfr. Figur 6.2. Vindrosene markert i rødt er lokale, mens de blå helfargede rosene er globale og vises som referanse.

---

Lokale vindroser kan benyttes både ifm. evaluering av vindkomforten i byrom, planlegging av nye bygg og i vurdering av tiltak, som f. eks. beplantning. Vindrosene kan også være av interesse når det gjelder spredning; de kan gi informasjon om hvilke kildeposisjoner som er av størst interesse for et område eller hvilke andre områder som er mest utsatt for spredning fra området man studerer.



---

---

## 7 Oppsummerende bemerkninger

I denne eksempelstudien har enkeltutslipp fra to ulike posisjoner blitt simulert og diskutert. Effekten av potensielle tiltak er også simulert og vurdert. Hovedfokus har vært på lokale detaljer og turbulens, samt betydningen av disse.

Når det gjelder forurensning over lang tid, store avstander og fra mange kilder er de lokale geometriske detaljene generelt mindre viktige og kan parametriseres. For kortvarige eller høyintense enkeltkilder, slik som tunnelmunninger, kan lokale forhold derimot spille en rolle. Større geometriske trekk, slik som Ekebergåsen eller annen topografi, kan være viktig også for forurensning over lengre tid og avstand.

En konseptuell metodikk for beregning av lokale vindroser er også foreslått, og seks lokale vindroser er beregnet som eksempler. Typiske geometri-effekter er tydelige i flere av de lokale vindrosene, og rosene skiller seg tidvis sterkt fra den globale vindrosen for Oslo.

Det overordnede målet med eksempelstudien har vært å demonstrere FFIs CFD-metodikk, detaljnivået på resultatene og hva resultatene kan benyttes til. Rammene av studien og mangel på konkrete ønsker fra SVV eller andre har satt noen begrensninger på de spesifikke detaljene i hva som har blitt gjennomført, men som beskrevet er mange utvidelser mulige ved behov. Forhåpentligvis har SVV (og evt. andre aktører) fått et klarere bilde av FFIs nåværende kapasiteter hva gjelder vind- og spredningsberegninger gjennom denne eksempelstudien. FFI er et forskningsinstitutt og jobber kontinuerlig med å utvikle og kvalitetssjekke sin metodikk. FFIs primære interesse er arbeid som gir grunnlag for videre forskning og utvikling, dog gjerne kombinert med nyttige anvendelser der dette er mulig.



---

---

## Referanser

- Aalbergsjø, S. og Vik, T. Indoor dispersion of sarin by evaporation from liquid pools. Tech. rep., Tech. Rep. 2016/01242, Forsvarets Forskningsinstitut, 2016.
- Blocken, B. Computational fluid dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91:219–245, 2015.
- Cabral, B. og Leedom, L. C. Imaging vector fields using line integral convolution. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 263–270 (ACM, 1993).
- Coirier, W. J., Fricker, D. M., Furmanczyk, M., og Kim, S. A computational fluid dynamics approach for urban area transport and dispersion modeling. *Environ. Fluid Dyn.*, 5:443–479, 2005.
- Dai, Y., Mak, C. M., Ai, Z., og Hang, J. Evaluation of computational and physical parameters influencing cfd simulations of pollutant dispersion in building arrays. *Building and Environment*, 137:90–107, 2018.
- Durbin, P. A. og Petterson Reif, B. A. *Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows, Second Ed.* (John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 2011).
- Endregard, M., Burkhart, S., Burman, J., Gentilhomme, O., Robins, A., Wingstedt, E., Petterson Reif, B., Persson, L., Brännström, N., Parmhed, O., Björnham, O., Leroy, G., Eriksson, D., Vik, T., Tørnes, J., og Issartel, J.-P. Moditic – modeling the dispersion of toxic industrial chemicals in urban environments. Tech. rep., Tech. Rep. 2016/01478, Forsvarets Forskningsinstitut, 2016.
- Fossum, H., Dybwad, M., og Helgeland, A. Computational modeling of health effects from indoor dispersion of airborne biological and chemical agents (18/02185). Tech. rep., Forsvarets Forskningsinstitut, 2018.
- Fossum, H. og Helgeland, A. Creating computational meshes from geographical information-system data for urban environments (17/16283). Tech. rep., Forsvarets Forskningsinstitut, 2017.
- Fossum, H. og Petterson Reif, B. Computational fluid dynamics simulations of flow and dispersion in the aerosol test chamber. Tech. rep., Tech. Rep. 2012/01030, Forsvarets Forskningsinstitut, 2012.
- Fossum, H., Reif, B., Tutkun, M., og Gjesdal, T. On the use of computational fluid dynamics to investigate aerosol dispersion in an industrial environment: A case study. *Boundary-Layer Meteorology*, 144:21–40, 2012.
- Franke, J., Hellsten, A., Heinke Schlünchen, K., og Carissimo, B. The cost 732 best practice guideline for cfd simulation of flows in the urban environment: a summary. *Int. J. Environ. and Pollut.*, 44 (1/2/3/4):419–427, 2011.
- García-Sánchez, C., van Beeck, J., og Górlé, C. Predictive large eddy simulations for urban flows: Challenges and opportunities. *Building and Environment*, 139:146–156, 2018.

- 
- 
- Gjesdal, T., Helgeland, A., Vik, T., Petterson Reif, B. A., og Endregard, M. Simulering av utslipp og spredning fra et lagringsanlegg for svoveldioksid. Tech. rep., Tech. Rep. 2013/02880, Forsvarets Forskningsinstitutt, 2013.
- Gousseau, P., Blocken, B., Stathopoulos, T., og Van Heijst, G. Cfd simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: a case study by les and rans for a building group in downtown montreal. *Atmospheric Environment*, 45 (2):428–438, 2011.
- Ham, F. og Iaccarino, G. Energy conservation in collocated discretization schemes on unstructured meshes. *Annual Research Briefs*, 2004:3–14, 2004.
- Ham, F., Mattsson, K., og Iaccarino, G. Accurate and stable finite volume operators for unstructured flow solvers. Tech. rep., Center for Turbulence Research, 2006.
- Lateb, M., Meroney, R., Yataghene, M., Fellouah, H., Saleh, F., og Boufadel, M. On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments- a review. *Environmental Pollution*, 208:271–283, 2016.
- Lien, F.-S. og Yee, E. Numerical modelling of the turbulent flow developing within and over a 3D building array, Part I: A high-resolution Reynolds-Averaged Navier-Stokes approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 112:427–466, 2004.
- Lien, F.-S., Yee, E., Ji, H., Keats, A., og Hsieh, K. J. Progress and challenges in the development of physically-based numerical models for prediction of flow and contaminant dispersion in the urban environment. *Int. J. of Comput. Fluid Dyn.*, 20:323–337, 2006.
- Mahesh, K., Constantinescu, G., Apte, S., Iaccarino, G., Ham, F., og Moin, P. Progress toward large-eddy simulation of turbulent reacting and non-reacting flows in complex geometries. *Annual Research Briefs*, pp. 115–142, 2002.
- Mahesh, K., Constantinescu, G., og Moin, P. A numerical method for large-eddy simulation in complex geometries. *Journal of Computational Physics*, 197:215–240, 2004.
- Osnes, A., Vartdal, M., og Petterson Reif, B. Numerical simulation of particle jet formation induced by shock wave acceleration in a hele-shaw cell. *Submitted: Shock Waves*, N/A:N/A, 2017.
- Pullen, J., Boris, J. P., Young, T., Patnaik, G., og Iselin, J. A comparison of contaminant plume statistics from a gaussian puff and urban cfd model for two large cities. *Atmospheric Environment*, 39 (6):1049–1068, 2005.
- Santiago, J. L., Martilli, A., og Martin, F. Cfd simulation of airflow over a regular array of cubes. part i: Three-dimensional simulation of the flow and validation with wind-tunnel experiments. *Boundary-Layer Meteorology*, 122:609–634, 2007.
- Stull, R. *Practical Meteorology: An Algebra-Based Survey of Atmospheric Science* (Dept. of Earth, Ocean & Atmospheric Sciences, University of British Columbia, 2017).
- Tennekes, H. og Lumley, J. L. *A First Course in Turbulence* (MIT press, 1972).
- Tolias, I., Koutsourakis, N., Hertwig, D., Efthimiou, G., Venetsanos, A., og Bartzis, J. Large eddy simulation study on the structure of turbulent flow in a complex city. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 177:101–116, 2018.



- 
- 
- Tominaga, Y. og Stathopoulos, T. Cfd simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques. *Atmospheric Environment*, 79:716–730, 2013.
- Tominaga, Y. og Stathopoulos, T. Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in the built environment. *Building and Environment*, 105:390–402, 2016.
- Versteeg, H. K. og Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (Pearson Education, 1995).
- Vik, T., Tørnes, J., og Petterson Reif, B. Simulations of the release and dispersion of chlorine and comparison with the jack rabbit field trials. Tech. rep., Tech. Rep. 2015/01474, Forsvarets Forskningsinstitutt, 2015.
- Wingstedt, E. M., Fossum, H. E., og Reif, B. A. P. Simulation of bomb residue deposition following the oslo bombing july 22, 2011. Tech. rep., Tech. Rep. 2012/01836, Forsvarets Forskningsinstitutt, 2012a.
- Wingstedt, E. M., Reif, B. A. P., og Fossum, H. E. On a small-scale indoor aerosol release. Tech. rep., Tech. Rep. 2012/00268, Forsvarets Forskningsinstitutt, 2012b.
- Wingstedt, E. M. M., Osnes, A. N., Åkervik, E., Eriksson, D., og Reif, B. P. Large-eddy simulation of dense gas dispersion over a simplified urban area. *Atmospheric Environment*, 152:605–616, 2017.
- Xie, Z.-T. og Castro, I. P. Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets. *Atmospheric Environment*, 43 (13):2174–2185, 2009.





## Tillegg



## A Svar fra spørreundersøkelsen

Tabell A.1 oppsummerer informasjonen fra spørreundersøkelsen som ble benyttet i kartleggingsfasen av eksempelstudien (jfr. kapittel 2).

Tabell A.1 Innhentet informasjon fra spørreundersøkelse.

		Antall (hvis > 1)
<b>Antall respondenter</b>		6
Respondentenes tilhørighet	SVV Miljødirektoratet Bymiljøetaten, Oslo kommune Plan- og bygningsetaten, Oslo kommune COWI	2
<b>Spørsmål 1</b>	<i>Hva slags problemstillinger, knyttet til luftstrømning, gasspredning og forurensning, er typisk aktuelle for dere?</i>	
Nøkkelord i respondentenes svar	Konsentrasjoner av NO2 og PM10 Overordnet beregning av luftkvalitet Luftsonekart er ofte tilstrekkelig Mulige tiltak for følsom bebyggelse Ønsker representative meteorologiske år Kildemodellering og nærkilde-spredning Effekt av nye bygg på luftforurensning Arealplaner Timevis beregning over flere år iht. grenseverdier Kildefordeling	4 3 2 2 2
<b>Spørsmål 2</b>	<i>Hva er ditt ansvarsområde i din organisasjon?</i>	
Nøkkelord i respondentenes svar	Tiltaksplaner Fagansvarlig, luft og klima Varsling Faglig rådgiver, trafikk Faglig rådgiver, støy Tverretatlig arbeid Høringssaker Målinger, måledata, beregninger, vurderinger, regelverk Rapport av luftkvalitet til offentlighet/EU Veiledning og rådgivning	3 3 2
<b>Spørsmål 3</b>	<i>Tar dere i bruk beregningsverktøy (som viser lokal vind eller luftkvalitet) som underlag i analyser og/eller for å se på effekten av ulike tiltak? Hvis ja, (a) til hvilke problemstillinger, og (b) hvilke verktøy blir brukt?</i>	
Nøkkelord i resp. svar (a)	Plan- og reguleringsaker	3

	Nei	2
	Tiltaksutredninger	2
	Rådgivning i enkeltsaker	2
	Varsling	2
	Påvise virkninger av topografi, bebyggelse mv.	
	Påvise detaljer i gule/røde luftsoner	
Nøkkelord i resp. svar (b)	SoundPLAN Air (GRAMM/GRAL)	2
	uEMEP	2
	AERMOD View	2
	MISKAM	2
	AirQUIS	
	Se oversikt på ModLUFT	
<b>Spørsmål 4</b>	<i>Finnes konkrete spørsmål eller problemstillinger som er vanskelige å løse med beregningsmodellene dere benytter i dag?</i>	
Nøkkelord i respondentenes svar	Munninger ved tunnel-/lokk	2
	Lokale vindroser	2
	Vind i gatekanaler	2
	Detaljer i bymiljøet mindre enn 100 m	2
	Detaljert meteorologi	
	Modellering i kompliserte områder der stagnasjon, ventilasjon eller vindretning endres av bygningsmasse	
	Manglende dokumentasjon for modellene	
	Modellene brukes ofte tilfeldig	
	Bedre modeller i 3D kreves for vesentlig forbedret prediksjon	
	Dyre investeringer gjøres basert på usikre modeller og antagelser	
	Detaljert meteorologi	
<b>Spørsmål 5</b>	<i>Finnes konkrete problemstillinger der dere ønsker å se på den lokale, kortvarige effekten av utslippskilde eller geometri (eller kombinasjonen av disse)?</i>	
Nøkkelord i respondentenes svar	I hovedsak nei	3
	Ja	
	Utlufting	
	Lokale vind- og spredningsforhold	
	Utsatte områder eller planlagt utbygde områder	
	Belyse plangrep som gir opprettholdt eller forbedret utlufting fremfor å beregne mer eksakte konsentrasjoner	
<b>Spørsmål 6</b>	<i>Hvilke avstander (altså hvilket detaljnivå) er mest relevant for deres arbeid? (1 m, 10 m, 100 m, 1 km, 10 km. . . ?)</i>	
Nøkkelord i respondentenes svar	Alle	2
	10–100 m	2

---

	100–1000 m	
	5–10 m	
<b>Spørsmål 7</b>	<i>Har dere sikkerhetsmarginer, statistiske metoder eller andre kriterier som dere ønsker at vi benytter oss av i beregning eller formidling av resultater?</i>	
Nøkkelord i respondentenes svar	T-1520	2
	Må være tydelig hvilken statistikk som er brukt	2
	Ønsker drøfting av usikkerhet og representativitet, både i modell og inndata	2
	Faglig integritet	
	Gjerne ta med et realistisk verste-tilfelle	

---





---

---

## B Beregning av lokale vindroser

Den nåværende beregningen av vindroser, jfr. seksjon 6.1, har noen mangler og forbedringsmuligheter som ikke har vært mulig å adressere innenfor rammene av denne eksempelstudien. Disse oppsummeres her.

- Den globale vindrosen som ligger til grunn for vektingen av de ulike vindretningene i de lokale vindrosene er i denne studien et snitt av data fra tre målestasjoner. Man kunne tenke seg et annet utvalg av data for globale vindroser, for eksempel vektet med nærhet til målestasjonene. Det ideelle valget av global vindrose ville kanskje vært basert på numeriske værsimuleringsdata (fra met.no eller andre), slik at hver datacelle i den meteorologiske værmodellen, med et celleareal på  $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$  på nåværende tidspunkt, inneholdt en “numerisk global vindrose”, basert på de beregnede vindretningene i modellen. Disse vindrosene ville antagelig vært mer konsistente med antagelsene i beregningene av lokale vindroser.
- Som beskrevet i rapporten beregnes lokale vindroser i denne studien ved å se på lokal middelvind for hver av de 18 simuleringene som er utført og vekte denne med data fra den globale vindrosen. Det hadde vært mer korrekt å først beregne lokale vindroser for hver enkeltsimulering, fordi man da ville unngått å “midle vekk” storskala-fluktuasjoner i vindretning, f. eks. fra langsom virvelavsetning. Man kunne så vektet hele vindrosen for hver simulering med korresponderende data fra global vindrose og slik akkumulert vindroser fra alle simuleringene til en komplett lokal vindrose. Denne utvidelsen fordrer imidlertid at nye simuleringer kjøres der data for slike lokale vindroser samles inn. Slike beregninger er prinsipielt ganske enkle, gitt nåværende metodikk (Fossum og Helgeland, 2017), men de er tidkrevende grunnet de store mengdene data som skal prosesseres.
- En siste relevant utvidelse er muligheten for å samle inn data om vindstyrke. Dette er mer krevende enn retning og krever et arbeid i form av både parametrisering og validering. Det bør dog ikke være umulig å gjennomføre.

På tross av mulighetene for forbedringer som er oppsummert ovenfor, er de lokale vindrosene beregnet i denne eksempelstudien godt egnet til å demonstrere metodikken og bruken av lokale vindroser. Mange av de lokale vindrosene fanger opp de viktigste lokale vindfenomenene, og på generell basis er vindrosene sannsynligvis ikke veldig ulike dem som ville framkommet fra mer utviklet metodikk. Store avvik vil dog kunne oppstå noen steder.

## About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

### FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

### FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

### FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

## Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

### FFIs FORMÅL

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

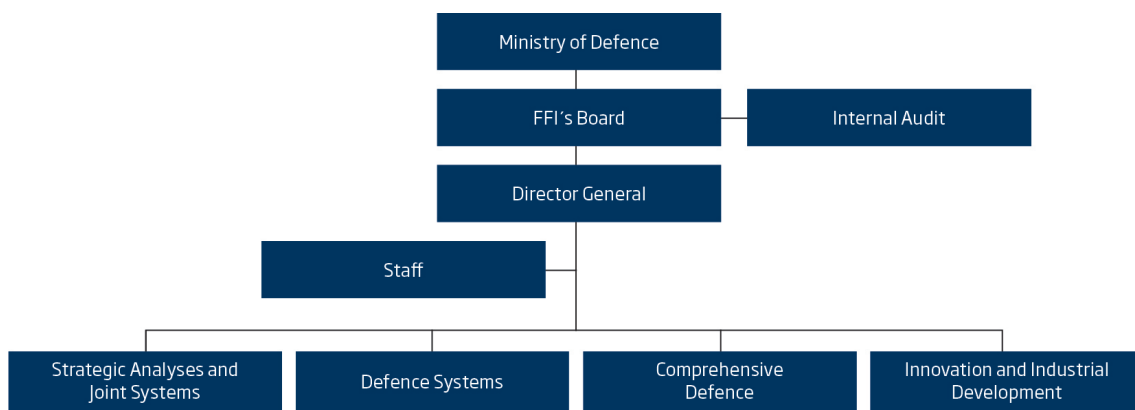
### FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

### FFIs VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

## FFI's organisation



**Forsvarets forskningsinstitutt**  
Postboks 25  
2027 Kjeller

Besøksadresse:  
Instituttveien 20  
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00  
Telefaks: 63 80 71 15  
Epost: [ffi@ffi.no](mailto:ffi@ffi.no)

**Norwegian Defence Research Establishment (FFI)**  
P.O. Box 25  
NO-2027 Kjeller

Office address:  
Instituttveien 20  
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00  
Telefax: +47 63 80 71 15  
Email: [ffi@ffi.no](mailto:ffi@ffi.no)