

Innholdsfortegnelse

1	Sammendrag	3
2	Innledning	4
3	Vind og turbulens	5
3.1	Innledning	5
3.2	Observert vind	5
3.3	Observert turbulens	5
3.4	Vurderinger av turbulens og flysikkerhet	7
3.4.1	Innledning.....	7
3.4.2	Avinor varslingsmetodikk for turbulens	7
3.4.3	NLR-kriteriene	8
3.4.4	Tolkning i denne rapporten.....	9
3.5	Strømningssimuleringer – Gjennomføring	10
3.5.1	Innledning.....	10
3.5.2	Modelloppsett.....	10
3.5.3	Simuleringer	13
3.6	Strømningsanalyser – Resultater	14
3.6.1	Innledning.....	14
3.6.2	Turbulens	14
3.6.3	Endring i sidevind	17
3.6.4	Endring i motvind (nesevind)	20
3.6.5	Vertikalvind.....	22
3.7	Diskusjon	22
3.7.1	Innspill fra brukere.....	22
3.7.2	Avinors varslingsmetodikk for turbulens	23
3.7.3	Helhetsplan 2065	23
3.8	Konklusjon	23
4	Tåke	24
4.1	Innledning	24
4.2	WRF	24
4.3	Vind i WRF	25
4.4	Skyvann i WRF	25
5	Bibliografi	28
6	Vedlegg	29
6.1	Vedlegg A: Large Eddy Simulation	29
6.2	Vedlegg B: Linjeplot av vertikalvind	36

1 SAMMENDRAG

Denne studien tar for seg mulige utfordringer med vind og turbulens generert av bygninger og terreng ved Ny lufthavn Bodø (NLBO). Det er også utført en vurdering av tåkeproblematikk ved ny rullebane som er oppsummert i rapporten.

Vind og turbulens

For å analysere turbulens og lokale vindendringer ved landing er det utført CFD-simuleringer (Computational Fluid Dynamics) med en LES (Large Eddy Simulation) modellering av turbulensen. Det er fokusert på vind fra nord, siden alle bygninger ved lufthavnen ligger på nordsiden av rullebanen. Resultatene er evaluert for innflygning fra begge sider («final approach» og «flare») og i en høyde 10 meter langs hele rullebanen.

Det er funnet at turbulensen er relativt lav og samsvarer med estimerer for eksisterende rullebane. Bygningene og Rishaugen øker turbulent hastighet (\sqrt{TKE}) noe ved nordlig vind, (slik bygningene ved eksisterende rullebane gjør i dag). En statistisk analyse tilsier at kriteriet for turbulens benyttet av Avinor ($\sqrt{TKE} < 3,5$ m/s) overskrides typisk 0,3 timer per år for nordlige vinder. Det kan forekomme overskridelser for sørlige vinder, anslått til mindre enn 1 time per år. Til sammenlikning er det anslått at turbulensgrensen ved dagens rullebane overskrides 2,2 timer per år.

Simuleringene er i også evaluert opp mot kriterier for sidevind og motvind foreslått av NLR (Royal Netherlands Aerospace Centre). Disse kriteriene tar for seg endringer i tidsmidlet vind langs innflygningen, og ikke turbulens direkte. I prosjektet er det funnet at disse kriteriene ikke er presist nok formulert til å dekke et reelt komplisert vindfelt som f.eks. det som finnes ved NLBO.

Basert på dette er det gjort et betydelig arbeid for å tolke NLR-kriteriene. Det foreligger to tolkninger som benyttes i rapporten. Tolkningen som ut fra kommunikasjon mellom Avinor og flyselskapene (Norwegian og Widerøe) vurderes som mest i samsvar med deres erfaring er såkalt «ensidig utslag». I dette tilfellet ses det på det største utslaget isolert uavhengig av om det er utslag i den andre retningen like før eller etter. Ut fra denne tolkningen ligger vindforholdene innenfor grensene av NLR-kriteriene, både for sidevind og motvind.

Hvis tolkningen omtalt som «totalutslag» legges til grunn, dvs. at det ses på forskjellen mellom positive og negative utslag, vil kriteriet brytes hhv. 2 timer per år for sidevind og 0,7 timer per år for motvind.

Det er gjennomført et brukermøte med SAS og Widerøe (Norwegian representert ved SAS) og kommentarene fra dette møtet er inkludert i rapporten. Brukerne anså ikke turbulens som et problem ved nordlig vind per i dag. Det ble heller ikke reagert på plassering av terminalbygg ut fra presenterte tegninger og 3D-modeller av bygningsmassen i forprosjektet.

Norconsult vurderer at turbulens og lokale vindendringer ved NLBO er akseptable slik planene for lufthavnen foreligger per i dag. Vurderingen er basert på simuleringer og analyser, innspill fra brukere og diskusjoner med Avinor.

Tåke

Basert på modellsimuleringer med en finskala værvarslingsmodell antydes en svak økning i antall timer med tåke ved NLBO (0 - 10 %) i forhold til dagens lufthavn, hovedsakelig for den delen av rullebanen som skal ligge på fylling i sjøen. Det er lite som tyder på økt forekomst av tåke som siger inn fra sør.

2 INNLEDNING

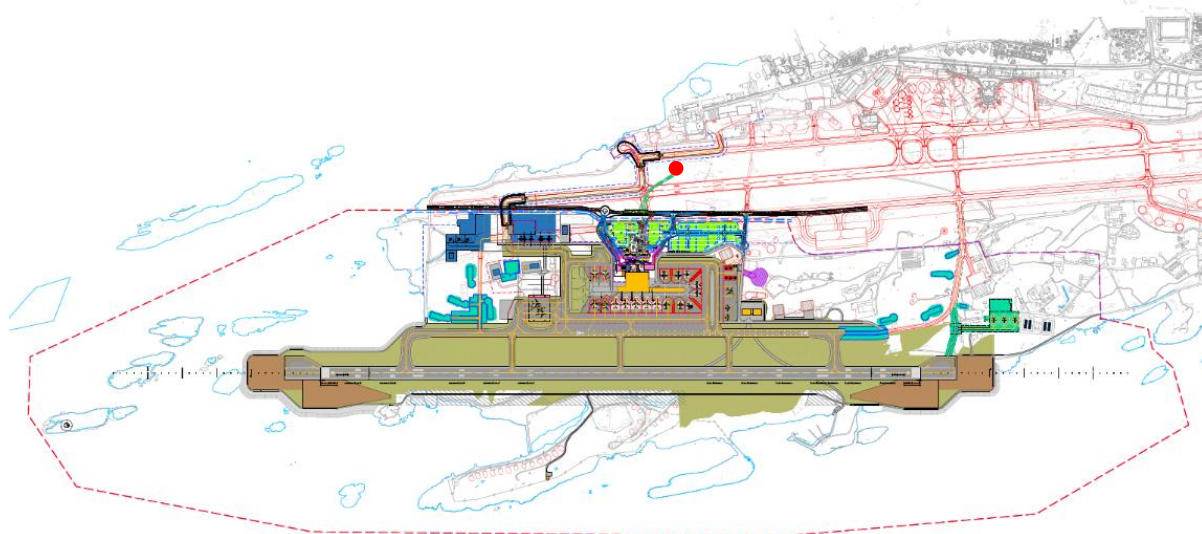
På oppdrag fra Avinor har Norconsult, ved de to avdelingene *Kjeller Vindteknikk (KVT)* og *CFD og strømnings-teknikk*, vurdert lokal turbulens ved Ny lufthavn Bodø (NLBO) og andre mulige meteorologiske utfordringer som kan ha betydning for den daglige driften av lufthavnen.

Et oversiktskart over den nye og den eksisterende lufthavnen er vist i figur 2-1. Den nye rullebanen er lokalisert ca. 900 meter lenger sør enn den eksisterende, er 2 600 meter lang og orientert i retning 80°- 260°.

Det er flere mulige meteorologiske utfordringer som kan ha betydning for den daglige driften av lufthavnen, hvorav de fleste er dekket av andre rapporter og notater. Meteorologisk institutt (MET) har utført en analyse av værmessig tilgjengelighet [1], samt en vurdering av risiko for bølger og ising [2]. METs analyse av værmessig tilgjengelighet tar derimot ikke for seg turbulens.

MET omtaler kort problematikk rundt havtåke om sommeren, og antyder at det vil være et marginalt problem med tåke som siger inn over ny rullebane. Videre er det mulig at værmessige utfordringer kan endre seg med fremtidig klima. Dette gjelder i hovedsak endret havnivå, som er beskrevet av Norconsult [3].

Med bakgrunn i dette tar denne rapporten både for seg turbulensproblematikk og gir en vurdering av muligheten for mer tåke ved ny plassering av lufthavnen.



Figur 2-1: Oversiktskart over eksisterende lufthavn i nord og planlagt nytt banesystem i sør. Rødt punkt viser plassering av eksisterende vindmåler som benyttes i analysene (stasjonsnummer 82290).

3 VIND OG TURBULENS

3.1 Innledning

Utfordringer knyttet til vind er i stor grad relatert til hyppighet av sidevind og turbulens. Førstnevnte er behandlet av MET [1]. I analysen vurderes turbulensen og effekt av bygninger/terreng på vindfeltet ved hjelp av CFD-beregninger.

3.2 Observert vind

Ved eksisterende lufthavn i Bodø er det gjort målinger av vinden i 10 meter høyde siden 1997 (stasjonsnummer 82290), og disse er tilgjengelige på timesbasis. Vindmåleren er lokalisert i den vestre del av dagens banesystemer, visualisert som et rødt punkt i figur 2-1. Det er noen hull i tidsserien, men siden dataserien er lang anses den som representativ for vindsituasjonen ved Bodø lufthavn. Basert på timesverdiene kan en fordeling av vindstyrke og vindretninger vises i en såkalt vindrose. Denne er vist i figur 3-1, og viser at østlig vind forekommer oftest, mens det er lite vind fra sør (på tvers av fjorden) og fra nord.

En vindrose kan også presenteres i tabellform, og i tabell 3-1 vises frekvens (hyppighet) av vind i hastighetsintervaller. Vindhastigheter under 5 m/s forekommer relativt sjeldent, og det er omtrent lik forekomst av vind i intervallet 0 - 3 m/s som i intervallet 3 - 5 m/s. Unntaket er østlig og sørvestlig vind, der det oftere er vind i intervallet 3 - 5 m/s. Som vist i figur 3-1 er østlig vind sterkt fremtredende, med vind under 5 m/s 7,8 % av tiden og 14,8 % av tiden i intervallet 5 - 8 m/s. Høyeste observerte vindhastighet, samt persentilverdier, er listet opp i tabell 3-2, og det kan her sees at vindstyrker over 20 m/s forekommer for alle sektorer unntatt 30° og 150°.

3.3 Observert turbulens

Observasjonene fra målestasjon 82290 inkluderer i tillegg til siste 10-minutters middelvind hver time også sterkeste 10-minutters middelvind (FX) og sterkeste 3-sekunders middelvind (FG, gust) per time. Ved gitte antakelser kan det fra disse estimeres standardavvik (σ), og dermed turbulensintensitet og turbulent hastighet.

Sammenhengen mellom FX, FG og standardavvik er basert på en tidligere studie [4], og kan uttrykkes slik:

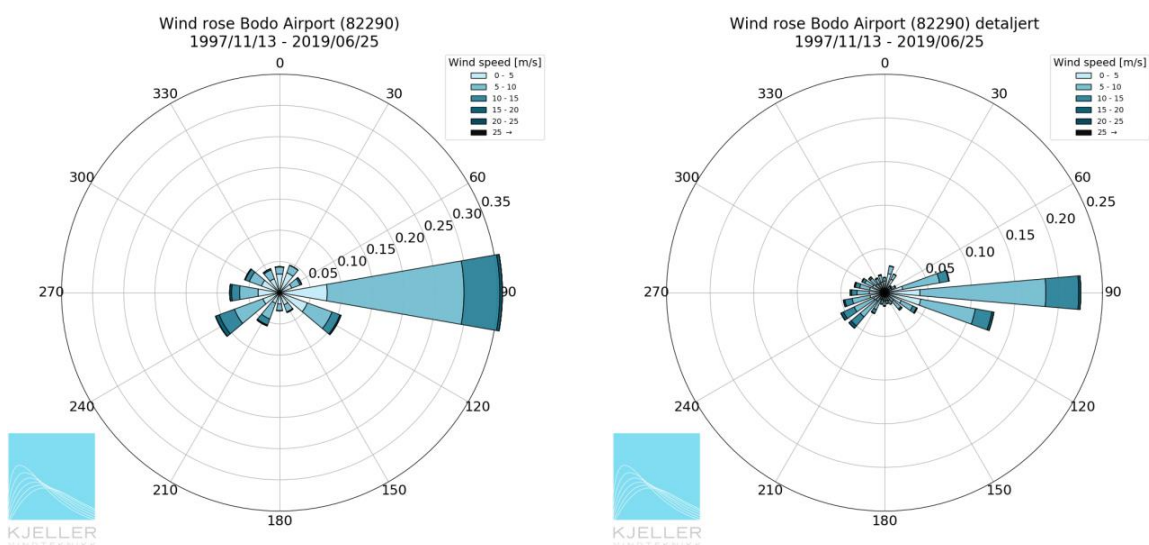
$$\sigma = \frac{FG - FX}{k} \quad (1)$$

der $k = 2,6$ er en ofte benyttet parameter for vind i 10 meter høyde.

Turbulensintensitet er gitt som forholdet mellom standardavviket og middelvindhastigheten, mens turbulent hastighet (\sqrt{TKE} , der TKE = turbulent kinetisk energi) er gitt ved:

$$\sqrt{TKE} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma \quad (2)$$

Basert på målingene fra 82290 kan dermed \sqrt{TKE} estimeres under de nevnte antakelser. I tabell 3-3 er estimert \sqrt{TKE} gitt for ulike vindhastighetsintervaller. Det er som ventet høyere \sqrt{TKE} for vind fra nord, da målingene sannsynligvis er påvirket av bygningene på nordsiden av måleren. For vindretninger med lang strøklengde over vann er \sqrt{TKE} forholdsvis lav. Fra sørøst og sør er \sqrt{TKE} noe høyere, mulig som følge av lokale terreng effekter eller på grunn av høyere bakgrunnsturbulens satt opp av terrenget sør for Saltfjorden. Det må presiseres at disse tallene er omtrentlige på grunn av antakelsene som er gjort.



Figur 3-1: Vindrosen for observert vind i måler 82290 ved Bodø lufthavn. Til venstre vises inndelt i 12 sektorer og til høyre mer detaljert i 24 sektorer. Fargekoden på vindrosen viser vindhastighet som 10 min middelvind (m/s). Lengden på hver sektorstolpe indikerer andelen av tiden med vind fra gitt retning.

Tabell 3-1: Frekvens [%] av vindhastigheter fordelt på vindretning. En sektor er definert som sektorretningen $\pm 15^\circ$. '-' betyr at det ikke finnes data for angitt vindhastighetsintervall og vindretning. Basert på målinger ved Bodø lufthavn i perioden 13.11.1997 – 25.6.2019.

Vindhastighet [m/s]	Sektor											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
< 3	0,8	1,3	1,1	2,3	1,7	1,0	0,9	0,8	1,1	1,7	1,7	1,3
3 - 5	0,9	2,2	1,0	5,5	3,1	1,1	1,0	1,0	1,8	1,8	1,4	1,3
5 - 8	0,5	1,2	1,1	14,8	3,2	1,0	0,9	1,8	3,1	2,1	1,5	1,2
8 - 10	0,1	0,1	0,4	7,6	1,1	0,3	0,2	1,0	1,8	1,0	0,6	0,4
10 - 12	0,0	0,0	0,2	3,9	0,8	0,1	0,0	0,6	1,4	0,7	0,4	0,1
12 - 15	0,0	0,0	0,1	2,0	0,6	0,0	0,0	0,4	1,2	0,6	0,3	0,1
15 - 18	0,0	-	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,1	0,5	0,2	0,1	0,0
18 - 20	0,0	-	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
20 - 25	0,0	-	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
> 25	-	-	-	-	-	-	0,0	-	0,0	-	0,0	-

Tabell 3-2: Persentiler og maksverdi for observert vindhastighet [m/s] i ulike sektorer, basert på målinger ved Bodø lufthavn i perioden 13.11.1997 – 25.6.2019

Forekomst	Sektor											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
99,0 %	10,4	9,2	15,2	15,1	16,2	11,8	11,5	17,2	18,9	18,0	16,2	13,1
99,5 %	11,7	9,7	16,9	16,2	17,1	12,6	13,9	18,5	19,9	19,3	17,7	14,3
99,9 %	14,8	11,1	19,1	18,8	19,9	14,3	19,9	21,1	23,1	21,7	20,2	17,3
Maks	20,7	14,8	20,2	24,9	23,6	17,6	25,2	24,2	26,1	24,6	25,8	21,7

Tabell 3-3: $\sqrt{\text{TKE}}$ [m/s] estimert fra målt vindkast og kraftigste 10-minutters middelvind per time, gitt $k=2,6$ i ligning (1)

Vindhastighet [m/s]	Sektor											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
4,5 - 5,5	1,2	1,1	0,8	0,7	0,9	1,1	1,1	0,9	0,8	0,8	0,9	1,2
7,5 - 8,5	1,9	1,6	1,1	1,1	1,5	1,6	1,6	1,4	1,2	1,2	1,3	1,8
9,5 - 10,5	2,5	1,9	1,4	1,4	1,9	1,9	2,1	1,7	1,5	1,5	1,6	2,2
14,5 - 15,5	2,6	2,9	1,8	2,0	2,3	2,6	2,2	2,3	2,2	2,2	2,3	3,0
17,5 - 18,5	3,5	-	2,2	2,4	3,0	2,4	3,6	2,7	2,8	2,6	2,7	3,3

3.4 Vurderinger av turbulens og flysikkerhet

3.4.1 Innledning

Rapporten analyserer CFD-resultater for turbulens og lokale endringer i vind ved NLBO. Da det ikke finnes noe formelt regelverk eller noen absolutte grenseverdier for disse forholdene, har det vist seg nødvendig å tolke resultatene ut fra flere ulike typer betraktninger.

I vurderingen av vindforhold over rullebane og langs inn/utflygingstraseer er det sett på konkrete resultater fra strømningsanalysene for hhv. turbulens, sidevind og med/motvind. Sammen med flyselskapene og Avinor er det så vurdert hvilken operativ virkning disse forholdene kan ha.

Det er først tatt utgangspunkt i å sammenlikne med vindmålinger for dagens rullebane på Bodø, hvor det foreligger lang operativ erfaring. Det er videre benyttet erfaring fra Avinors etablerte varslingsmetodikk for turbulens, samt foreslåtte kriterier for bygningsindusert tap av sidevind og motvind fra NLR (Royal Netherlands Aerospace Centre).

Dette kapittelet går igjennom en del grunnlag for disse vurderingene. Simuleringene presenteres i kapittel 3.5 og resultatene diskuteres i kapittel 3.7.

3.4.2 Avinor varslingsmetodikk for turbulens

Avinor har lenge hatt praksis av å benytte en grenseverdi for $\sqrt{\text{TKE}}$ på 3,5 m/s for varsling av turbulens ved operative CFD-simuleringer med modellen SIMRA. Tabell 3-3 viser estimert $\sqrt{\text{TKE}}$ ut fra målingene ved dagens rullebane og en ser at dette nivået typisk kan nås ved de høyeste vindhastighetene.

Ved å skalere turbulensnivået i tabellen med vindhastigheten, kan en estimere ved hvilken vindhastighet turbulensen når grenseverdien på 3,5 m/s. Vindstyrken dette inntreffer ved omtales som «kritisk hastighet». Ut fra vindstatistikken (tabell 3-1) kan andel av tiden grenseverdien statistisk sett vil overskrides beregnes. Resultatene fra disse beregningene er presentert i Tabell 3-4.

Kritisk hastighet varierer mellom 17 og 28 m/s for ulike vindsektorer. De laveste verdiene finnes ved nordlig vind, sannsynligvis forårsaket av at bygningene, som ved disse vindretningene ligger like oppstrøms for vindmåleren, øker turbulensintensiteten. Bygningene skjermer derimot også for middelvind og dette er nok en av grunnene til at vind fra flere andre sektorer når kritisk hastighet hyppigere. Det er estimert at det totalt sett er 2,2 timer med overskridelser av kriteriet per år ved dagens rullebane.

Tabell 3-4: Estimert kritisk hastighet og antall timer overskridelser av Avinors kriterium for varsling av turbulens ($\sqrt{TKE} \geq 3,5$ [m/s]) ved eksisterende rullebane.

	Sektor												Sum
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
Kritisk hastighet [m/s]	17,6	18,6	27,3	25,9	21,1	22,0	19,7	22,0	23,3	23,7	23,0	17,7	
Overskrides [timer/år]	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,3	0,2	0,8	0,1	0,1	0,3	2,2

3.4.3 NLR-kriteriene

Innen fluiddynamikken deles et turbulent hastighetsfelt gjerne opp i en sum av to bidrag, middelhastighet og turbulente fluktuasjoner. Turbulensen representerer avviket mellom den faktiske hastigheten («øyeblikksbildet») og middelhastigheten. I tillegg til turbulens vil et fly under landing bevege seg gjennom endringer i middelvindfeltet. Komplisert terreng eller store bygninger kan skape så raske skifter at det, for et fly som beveger seg gjennom dem, vil oppleves på samme måte som «turbulens».

En nederlandsk studie utført av NLR har foreslått kriterier for tap av vindhastighet bak en enkeltstående bygning [5]. Arbeidet er basert på studier med avanserte flysimulatorer, men vindfeltene som er benyttet i simulatorene er relativt enkle. Det er eksempelvis ikke sett på turbulens direkte forårsaket av en bygning, men kun tap av middelhastighet. Middelvindfeltet bak «obstruksjonen» som er benyttet (eg. en vind-/støyvegg) er så superponert på typisk atmosfærisk turbulens, som er variert i nivåer mellom «lavt» og «svært høyt».

Kriteriene beskriver således en stilistisk reduksjon av vind (se figur 3-2) i form av tap av hhv. sidevind eller mot/medvind. I virkeligheten vil det i praksis være både vindreduksjoner og vindøkninger langs flyets bane. Dette gjelder særlig der topografiske forhold kompliserer strømningsbildet, som ved mange norske flyplasser. Det er ikke spesifisert hvordan slike forhold skal behandles.

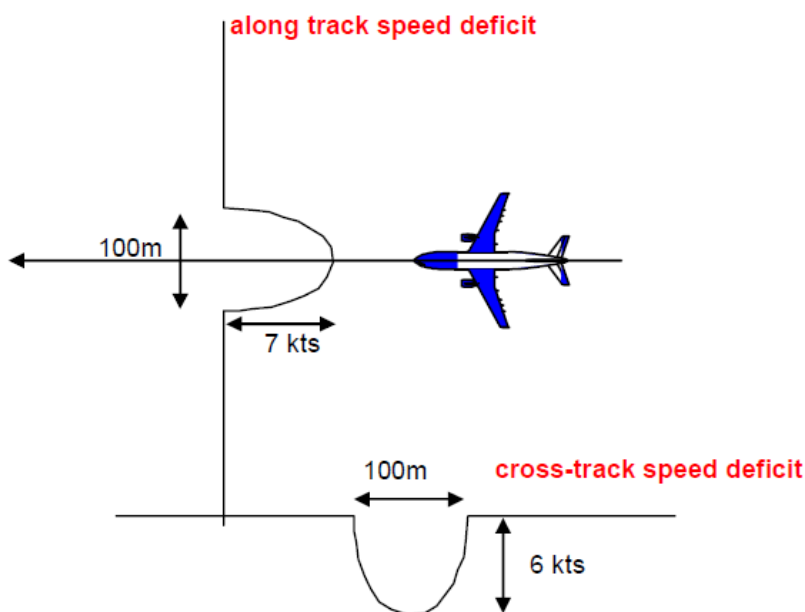
Kriteriet inneholder også en spesifikasjon av at den minste utstrekningen for vindreduksjoner som skal tas med i betraktningen er 100 meter. Det er ikke gitt noen retningslinjer for hvordan dette skal evalueres i praktiske situasjoner hvor det er overlappende reduksjoner, og økninger, med både med kortere og lengre utstrekning.

For å kunne benytte kriteriet er det i NLBO-prosjektet, i samarbeid med Avinor, utviklet en metodikk for å evaluere NLR-kriteriene. I grove trekk består denne av at det benyttes et tusenmeters løpende middel for å finne «bakgrunnsnivået» / «nullnivået». De lokale vindendringene regnes så i forhold til dette profilet. For å ta høyde for at minste lengde for en vindendring skal være 100 meter, er vindfeltet også filtrert med et løpende middel med 100 meter lengde.

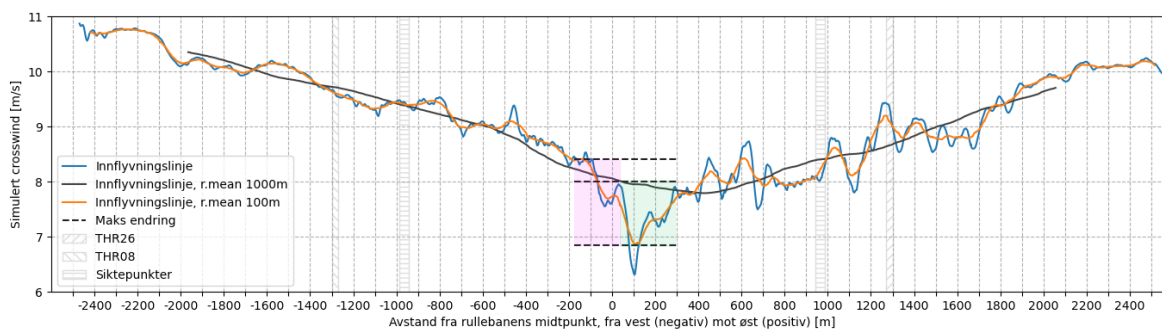
Figur 3-3 viser et eksempel på bruk av metoden (endring i sidevind). Den horisontale akse indikerer lengde langs rullebanen, mens vindstyrken er vist langs vertikal akse. Skraverte grå felt indikerer plasseringen av rullebanens terskler og siktepunkt. Den blå linjen viser beregnet middelhastighet langs innflygning og i 10 meters høyde over rullebanen. Den oransje linjen er hundremeters løpende middel (en ser f.eks. at det raske/korte tapet av vindhastighet rundt $x = 100$ meter forsvinner fordi utstrekningen er mindre enn 100 meter). Ved evaluering av NLR-kriteriet ses det derfor på differansen mellom oransje og svart linje (nullnivået).

Selv etter etableringen av denne metodikken kan NLRs kriterier i virkelighet tolkes på minst to måter: enten (a) «ensidig utslag» fra nullnivået eller (b) som et «totalutslag» mellom nærliggende maks/min-verdier. De korresponderende avlesningene er markert med stiplede streker og fargede områder i figur 3-3: (a) er markert med grønt og (b) med lilla.

Avinor har hatt samtaler med brukerne angående vurderingene av NLR-kriteriene. I samtalene har den «stilistiske tilnærmingen» blitt knyttet til spørsmål om det finnes tilstrekkelige kontrollressurser (hastighet/motorkraft/rorautoritet) til å holde flyet på planlagt innflygingstrasé (lateralt og vertikalt) innenfor akseptable toleranser. Det fremgår av kommunikasjonen at flyselskapene vurderer tolkning (a) som mest i samsvar med deres erfaring.



Figur 3-2: Framstilling av typen vindendringer som er lagt til grunn i NLR-kriteriene [5]



Figur 3-3: Eksempel på analyse med metodikken for NLR-kriteriene. Grønt område viser «ensidig utslag» og lilla sone «totalutslag».

3.4.4 Tolkning i denne rapporten

Det er vurdert ulike metoder for å analysere strømningsresultatene. For NLR-kriterienes del har det vært nødvendig å utvikle en egen metodikk for å «tolke» resultatene. Dette er altså tolkning hvor en egentlig benytter metoden for andre forhold enn det den ble utviklet for. Helt konkret vurderte NLR ett enkelt hastighetstap bak én enkeltstående «bygning» og ikke et faktisk sammensatt vindfelt.

Grenseverdien i Avinors varslingsmetodikk for turbulens er derimot benyttet i en årrekke i Norge og er anerkjent i operativ bruk. Det vurderes at denne representerer et sikrere valg av grenseverdi enn NLR-kriteriene.

Planene for NLBO og simuleringresultater har vært lagt fram for brukerne blant annet gjennom brukermøte i februar 2020 hvor SAS og Widerøe var til stede (SAS hadde avtalt at de representerte Norwegian) og i diskusjoner mellom Avinor og brukerne høsten 2020 (primært Norwegian og Widerøe).

Ut fra kunnskapene som er opparbeidet er det valgt å rangere vurderingene i rekkefølgen:

- 1) Brukernes vurdering av presenterte resultater sett i lys av deres erfaringer fra dagens rullebane
- 2) Avinors etablerte varslingsmetodikk for turbulens
- 3) NLR-kriterier for endringer i middelvind

3.5 Strømningssimuleringer – Gjennomføring

3.5.1 Innledning

Simuleringene er utført av Norconsult ved avdeling for CFD og strømningsteknikk som er en gruppe spesialisert innen numeriske beregninger av strømninger, inkl. vindanalyser og aerodynamikk. Modelloppsettet er beskrevet i kapittel 3.5.2, simuleringene i kapittel 3.5.3 og resultatene i kapittel 3.6.

3.5.2 Modelloppsett

CFD er en forkortelse for det engelske uttrykket Computational Fluid Dynamics og innebærer at de fundamentale likningene for fluiders bevegelse, Navier Stokes-likninger, løses ved numerisk iterasjon. Norconsult har lang erfaring med CFD-analyser innen vind og lokalklima og benytter den ledende programvaren ANSYS CFX (<http://www.ansys.com>).

Beregningsmodellen i prosjektet er konstruert ut fra digitale terrengdata og 3D-modeller for bygninger og banesystemer i forprosjektet.

Den geografiske utstrekningen av en CFD-modell velges ut fra erfaring og med målet at avstanden til modellens yttergrenser skal være stor nok til at strømmingen i de områdene undersøkelsene gjelder, ikke skal påvirkes av utstrekningen. Basert på en slik vurdering fikk modellen en utstrekning på 5 000 meter i øst-vest retning, 2 600 meter i nord-sør retning, og høyde opp til 500 moh.

Ved CFD-simuleringer av lokale vindforhold er håndtering av turbulens i strømmingen svært viktig for løsningsens kvalitet. I dette arbeidet ble det til slutt valgt å benytte LES (Large Eddy Simulation) framfor mer tradisjonell RANS-modellering (Reynolds Averaged Navier Stokes¹). LES er svært beregningskrevende i forhold til RANS, noe som er grunnen til at metodikken historisk er benyttet i mindre grad. Nøyaktigheten er derimot generelt antatt å være betydelig bedre enn RANS, noe det argumenteres for i Vedlegg

Vedlegg A: Large **Eddy Simulation**.

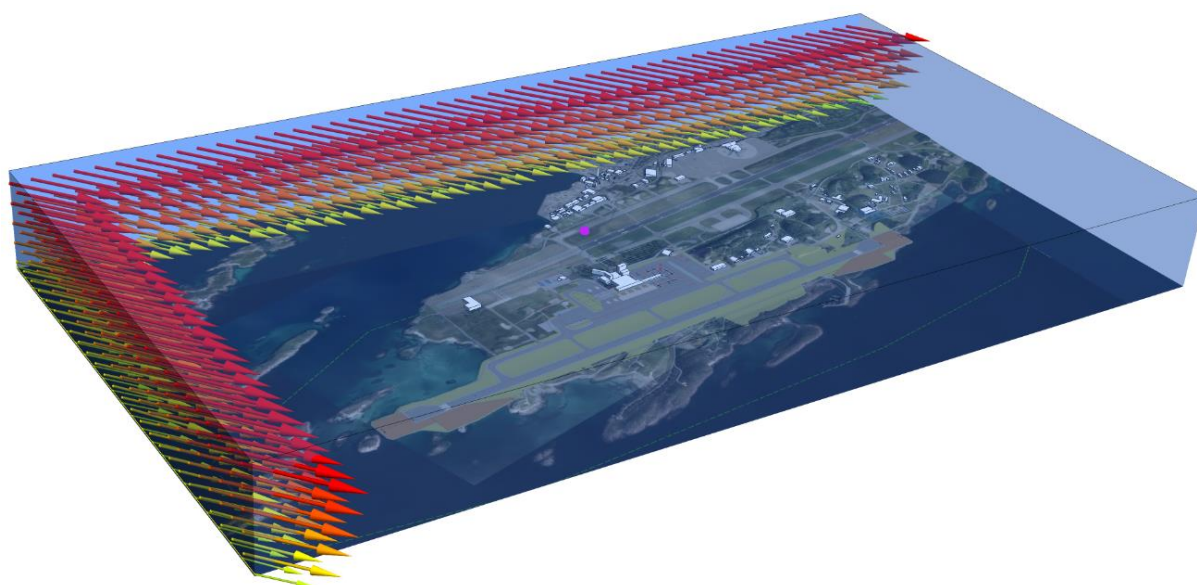
For alle yttergrenser i en CFD-modell (innløp, utløp og faste overflater) må det spesifiseres fysiske parametere som bestemmer «omverdenens påvirkning» på beregningsområdet. Langs innløpene i denne modellen er vindhastighet og vindretning, samt to turbulensvariable (turbulent energi og dissipasjon) låst til forutbestemte profiler. For utløpene i motsatt ende av modellen, og langs toppen av volumet, benyttes «trykkbetingelser», hvor luften er fri til å bevege seg ut av volumet avhengig av hvor beregningen inne i volumet fører den.

Modellvolumet er vist i figur 3-4. Vektorpilene viser vindfeltet langs de to sidene som danner innløpet til modellområdet for denne spesifikke vindretningen. Vindhastighet og turbulens

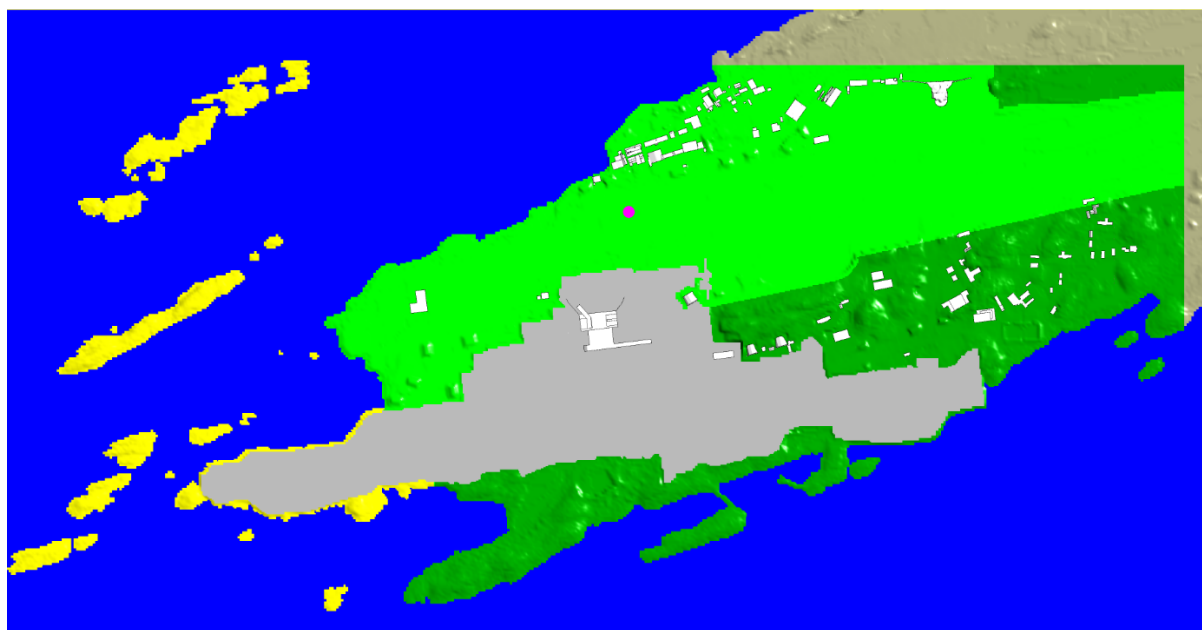
¹ Reynoldsmidlet Navier-Stokes, som inkluderer bl.a. to-likningsmodeller som $k-\epsilon$ og SST.

varierer med høyde over bakken/havet med profiler avhengig av terrengets aerodynamiske ruhet oppstrøms for modellområdet.

Figur 3-5 viser valgt terrengruhet (z_0) for de ulike delene av modellens nedre flate. Grå og lysegrønne områder har $z_0 = 5$ cm og representerer åpent og flatt terreng langs hhv. de nye og de gamle lufthavnsområdene. Gule områder har ruhet $z_0 = 10$ cm og er valgt på steder der det er mindre vegetasjon, stein og ur. Mørkegrønne områder har ruhet $z_0 = 20$ cm og dekker områder med trær og annen større vegetasjon. De brune områdene som vender mot nord og øst har $z_0 = 25$ cm og representerer områder med småhusbebyggelse etc. som ikke er løst opp med geometri direkte i modellen. Sjøens aerodynamiske ruhet er satt til $z_0 = 1$ mm.



Figur 3-4: Oversikt over CFD-modellen. Vektorer viser middelvind inn i modellen ved vindretning 320° . Modellerte bygninger er vist i hvitt. Ortofoto er lagt på de nedre flatene langs terreng og sjø. Den rosa sirkelen viser plasseringen av vindmåleren ved eksisterende lufthavn.



Figur 3-5: Oversikt over terrengruhet z_0 i modellen (blått: 1 mm, grått og lysegrønt: 5 cm, gult: 10 cm, mørkegrønt: 20 cm og brunt: 25 cm)

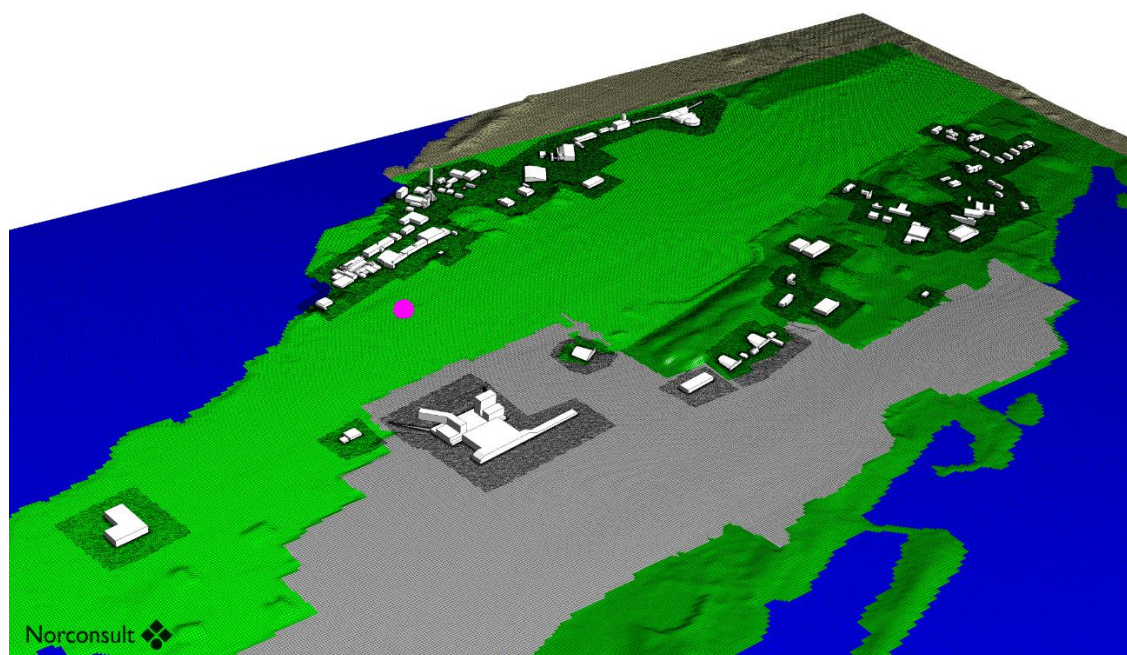
Hoveddelene av modellen er konstruert med terrengfølgende heksaedriske beregningsceller som gir en effektiv inndeling av modellområdet for slike strømninger. Cellestørrelsen i disse områdene er 5 × 5 meter horisontalt, mens den vertikalt varierer fra 1 meter langs terrenget til 25 meter ved topp av volumet.

I sonene rett rundt bygningene er det benyttet en kombinasjon av tetraedre og prismatiske celler. Dette er celletyper som gjør det lettere å representere kompleks geometri og dermed å modellere det store antall bygninger som finnes innenfor modellområdet. Cellene vokser fra rundt 1 meter ved bygninger og langs bakken til 5 meter ved overgangen til områdene med heksaedriske celler.

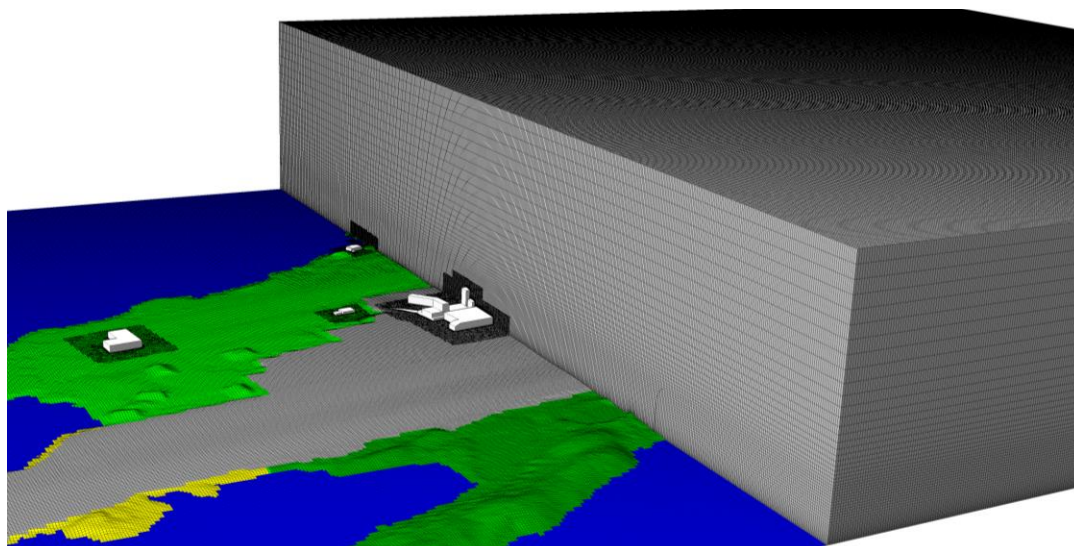
Figur 3-6 viser bygningene som er modellert ved NLBO og eksisterende lufthavn, samt beregningscellene langs terrenget. Flyoppstillingsplassene foran terminalbygget ligger rundt 8 moh. Toppen av terminalbygget ligger ca. 17 meter over dette nivået. Det høyeste bygget er hotellet på nordsiden av terminalbygget på ca. 48 meter.

Figur 3-7 illustrerer den vertikale oppløsningen av beregningsnettet. Modellen består av totalt 31 millioner volumceller.

Simuleringene med vind fra sør (170°) ble startet med den samme modellen, men ferdigstilt med en forenklet modell som strekker seg lenger utover fjorden mot sør, men kortere mot nord, og inkluderer ikke bygninger her. Modellen har samme heksaedriske beregningsceller i hele området som i den viste modellen, men redusert celleantall til 22 millioner.



Figur 3-6: Oversiktsbilde av bygninger og beregningsnett langs terrenget



Figur 3-7: Snitt gjennom modellen som illustrerer oppløsningen av beregningsnettet i vertikal retning

3.5.3 Simuleringer

Tabell 3-5 gir en oversikt over simuleringene i denne analysen. Det er utført simuleringer for 6 vindretninger, hvorav 5 er nordlige vindretninger. Det er fokusert på nordlig vind da den primære problemstillingen var påvirkning av bygninger på vindfeltet, som alle ligger nord for ny rullebane. Det er kjørt én simulering med vind fra sør (170°) for å sjekke hvilke utslag terrenget på sørsiden av rullebanen typisk kan gi.

Det er ikke simulert vind parallelt med rullebanen, selv om spesielt den østlige vindretningen forekommer hyppig i Bodø. Årsaken er at vinden da komme direkte inn fra sjøen og vil være svært lite påvirket av terreng eller bygninger.

Tabell 3-5: Oversikt over simulerte vindretninger

Nordlig vind	290°, 320°, 350°, 20°, 50°
Sørlig vind	170°

3.6 Strømningsanalyser – Resultater

3.6.1 Innledning

I de neste kapitlene presenteres hovedresultater i form av turbulent vindhastighet (\sqrt{TKE}), sidevind, motvind og vertikalvind. Resultatene illustreres med linjeplott som viser verdiene langs en «flylinje» som følger innflyging fra begge sider, samt over rullebanen i 10 meters høyde. Innflygingen er definert ut fra 3° vinkel for glidebanen og at den passerer tersklene i en høyde på 15 meter (50 fot). Rullebanens senter har koordinat $x = 0$ og tersklene finnes ved $x = \pm 1$ 300 meter.

For lettere å sammenligne resultatene med måledataene er vindhastigheten i alle figurer skalert til å være 8 m/s ved eksisterende vindmåler. Det er data fra denne stasjonen som benyttes i de statistiske analysene i rapporten. Målerens plassering er markert med et rødt punkt i figur 2-1, samt i plottene fra CFD-modellen (rosa punkt).

Det presiseres at simuleringene er vist kun med figurer for 8 m/s, men at vinden oppfyller det som på fagspråket kaller å «skalere»², slik at alle målte vindhastigheter i perioden 1997 – 2019 er tatt med i den statistiske beregningen. Dette inkluderer altså de sterkeste vindene fra alle sektorer.

3.6.2 Turbulens

Figur 3-8 viser turbulensen langs flylinjen. Blå linje er rådata fra simuleringen, mens grå linje er 1000-meters løpende middel langs flylinjen, og oransje linje et 100-meters løpende middel. Det er den oransje linjen som er benyttet for å finne maksimalverdien, da det er turbulensen flyet opplever over en viss strekning som kan påvirke flyets posisjon og retning.

En ser generelt at turbulensen er lav i vest og øker mot midten av rullebanen. Årsaken til dette er at turbulensen øker der det finnes terreng og bygninger oppstrøms, altså langs rullebanens senter og den østlige delen av området. Utenfor tersklene befinner flyet seg i større høyder og dermed i områder med lavere turbulensnivå. \sqrt{TKE} ved 8 m/s referansevind (dvs. ved vindmåler) ligger generelt mellom 0,5 m/s og 1,8 m/s.

Tabell 3-6 viser den statistiske beregningen for andel av tiden Avinor-kriteriet på 3,5 m/s overskrides ved de ulike vindretningene, og ved hvilken hastighet dette inntreffer. En ser at kriteriet statistisk sett overskrides 0,29 timer i året fra de nordlige vindretningene.

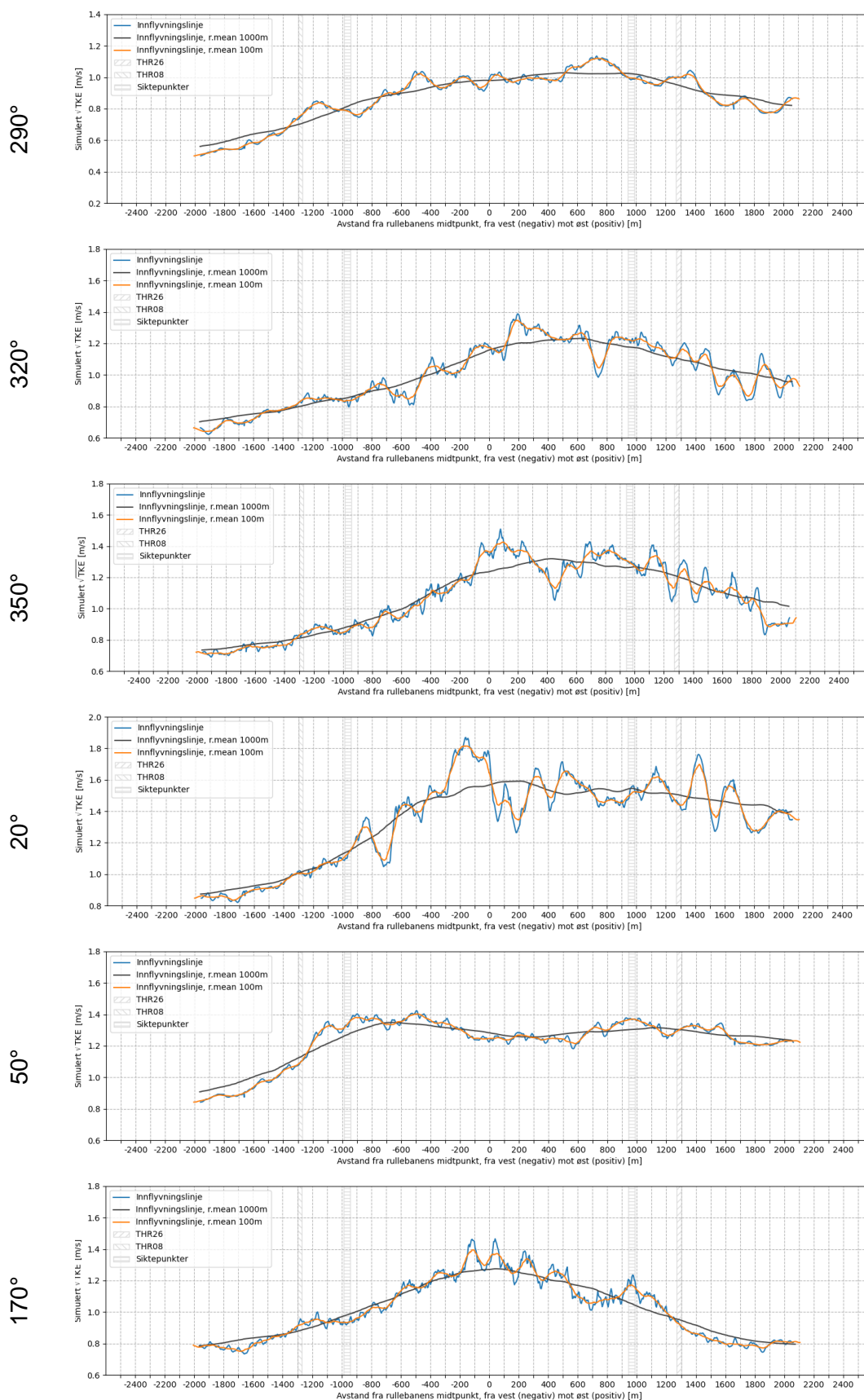
Ved vind fra sør medfører små lokale terrengdetaljer beregnede overskridelser 0,18 timer per år. Det er ikke undersøkt mer enn én vindretning fra sør og det er derfor vanskelig å si om tilsvarende forhold gjør seg gjeldende for andre sørlige vindretninger. Det virker derimot rimelig at effekten av slik turbulens blir mindre når vinden kommer på skrått og avstanden til rullebanen øker, og det antas derfor at kriteriet totalt sett brytes mindre enn 1 time per år for sørlige vinder³. Turbulens skapt på denne måten vil sannsynligvis ha små lengdeskalaer (liten utbredelse) og neppe påvirke et fly av aktuell størrelse i nevneverdig grad.

Tabell 3-6: Beregning av ved hvilken vindhastighet Avinors kriterium for turbulens brytes («kritisk hastighet») og hvor ofte dette statistisk sett inntreffer

Avinor-kriterium for turbulens							
Sektor	290 ± 15	320 ± 15	350 ± 15	20 ± 15	50 ± 15	170 ± 15	Sum
Kritisk hastighet [m/s]	25,0	20,8	19,6	15,4	20,0	20,1	
Overskridelser [timer/år]	0,05	0,14	0,05	0,00	0,05	0,18	0,46

² Andre vindhastigheter kan vurderes ved å multiplisere vindhastigheten med en valgt faktor.

³ 5 sektorer x 0,2 timer per år per sektor = 1 time per år

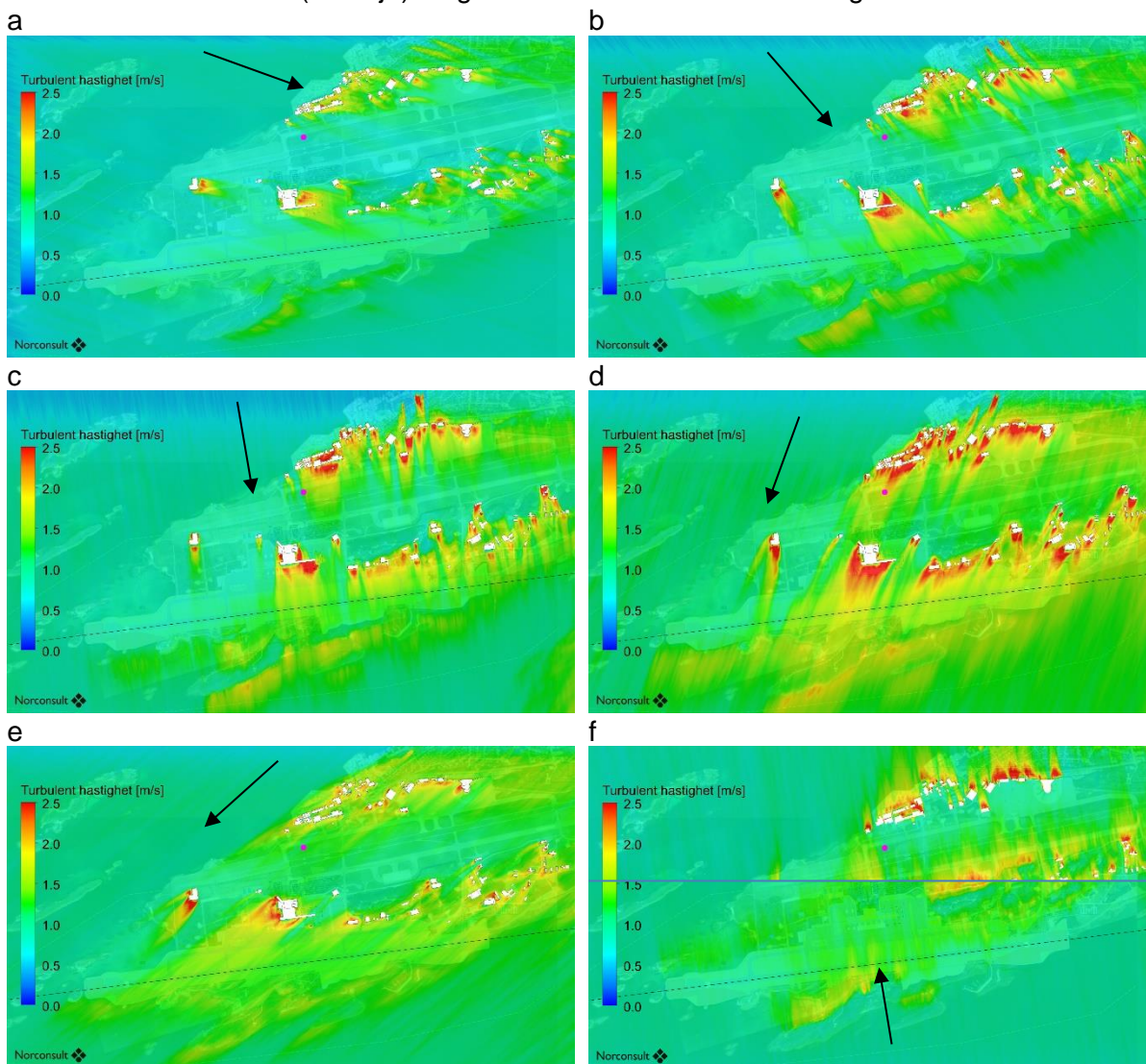


Figur 3-8: Turbulent vindhastighet langs innflyging fra begge sider og 10 m over rullebanen. Vindretninger 290°, 320° og 350° (normalt på rullebane fra nord), 20°, 50° og 170° (normalt på rullebane fra sør). Vest mot venstre og øst mot høyre. Rullebanens midtpunkt ligger ved x = 0 og tersklene ligger ved x = ± 1 300 m.

Horisontalplott av turbulent hastighet i 10 meters høyde er vist i figur 3-9. Vindretningen er indikert med piler i figurene.

Legg merke til at figuren for 170° er delt i to, den nederste delen er her timesmiddel fra simuleringsmodellen som er strukket lenger mot sør (se kapittel 3.5.2), mens den øverste delen av figuren er 10 min-middel fra simuleringsmodellen som er benyttet for alle simuleringene med nordlig vind.

Den turbulente hastigheten er høyest i vakene rett bak bygningene. Her når verdien over 2,5 m/s (rød farge i plottene inkluderer verdier over maks i skalaen). Som i linjeplottene er verdiene er under 2 m/s (oransje) langs rullebanen for alle vindretninger.

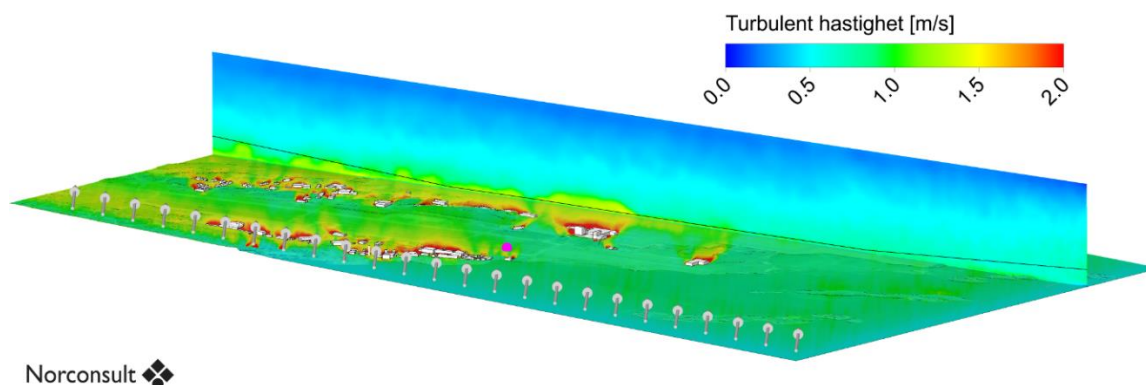


Figur 3-9: Turbulent hastighet i 10 m høyde for vindretninger 290° (a), 320° (b), 350° (c), 20° (d), 50° (e) og 170° (f) ved vindhastighet på 8 m/s ved eksisterende vindmåler (rosa prikk). Vindretning er angitt med svart pil.

Ved å sammenlikne turbulensverdiene ved vindmåleren med tallene for estimert turbulens i tabell 3-3, ser en at det er god overensstemmelse mellom simuleringer og målinger. En ser også godt hvordan vakene bak dagens bygninger påvirker turbulensen ved nordlig vind.

Et lengdesnitt langs rullebanen for vindretning 320° er vist i figur 3-10. Figuren er plottet uten perspektivvirkning, og sett langs vindretningen, for å gjøre det lettere å identifisere hvilke objekter som skaper turbulensen. Den grå linjen viser linjen som linjeplottene er generert langs. En ser at turbulensen fra bygningene avtar med avstand nedstrøms, men sprer seg utover,

både i bredde og høyde. En sammenhengende sone med økt turbulens kan sees opp til en høyde på 50 - 70 meter bak terminalkomplekset. I lengderetning dekker denne sonen noe større bredde enn byggene. En ser også terreng- og bygningsindusert turbulens lenger øst.



Norconsult

Figur 3-10: Turbulent hastighet langs rullebanen, for vindretning 320°. Resultatene vises fra bakken og opp til 500 m (toppen av beregningsvolumet). Den grå heltrukne linjen representerer innflygingsbanene, samt en linje 10 m høyde over rullebanen. Turbulens i 10 m høyde er vist langs terrenget.

3.6.3 Endring i sidevind

Linjeplott for sidevind er vist i figur 3-11. Blå linje representerer middelvind. Oransje linje viser middelvinden etter at den er glattet for å fjerne raske endringer (< 100 meter). Grå linje viser «bakgrunnsnivået», evaluert som et tusenmeters løpende middel.

Ved vind fra 290° lander flyet vanligvis fra øst (høyre side i figuren). En ser her en betydelig reduksjon av sidevinden nær terskel, fulgt av en økning rundt siktepunktet. Hele hendelsen har en utbredelse på ca. 700 meter og dermed en varighet på rundt 10 sek for en Boeing 737. Hendelsen er dermed lang nok til at den påvirker flyet og glattingen har neglisjerbar effekt. Hastighetsendring som benyttes i den statistiske bearbeidelsen er vist som grønn og lilla soner, hhv. for ensidig utslag og totalutslag.

For 320°, 350° og 20° er de største utslagene så kortvarige at de gattes noe før avlesning. Ved 50° og 170° er det vurdert at de største hastighetsendringene skjer rundt «flare» og at de største utslagene til dels skyldes det naturlige bakgrunnsnivået. Totalutslaget er derfor lest av som summen av de største påfølgende avvikene over og under bakgrunnsnivået.

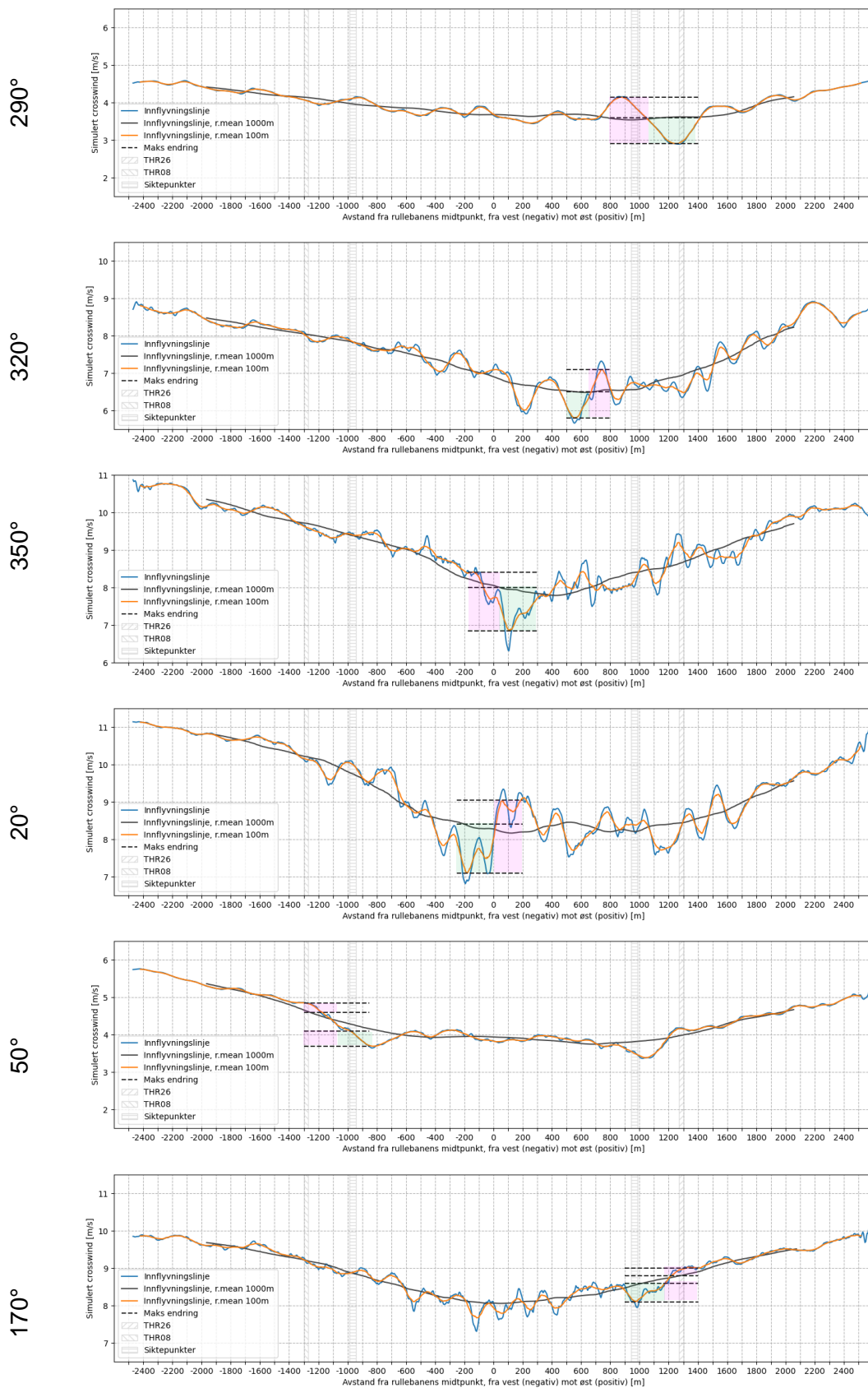
Tabell 3-7 og tabell 3-8 oppsummerer de statistiske evalueringene for sidevind. En ser at det er funnet hhv. ingen overskridelser for ensidig utslag og 2 timer overskridelser per år for totalutslag. Det største bidraget finnes ved vind fra 290°, som er redegjort for i avsnitt over.

Tabell 3-7: Beregning av ved hvilken vindhastighet NLR-kriteriene for sidevind brytes og hvor ofte dette inntreffer statistisk sett - for evaluering med «ensidig utslag»

NLR-kriterium for sidevind – ensidig utslag							
Sektor	290 ± 15	320 ± 15	350 ± 15	20 ± 15	50 ± 15	170 ± 15	Sum
Kritisk hastighet [m/s]	35,4	35,4	21,6	19,1	60,5	49,6	
Overskridelser [timer/år]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

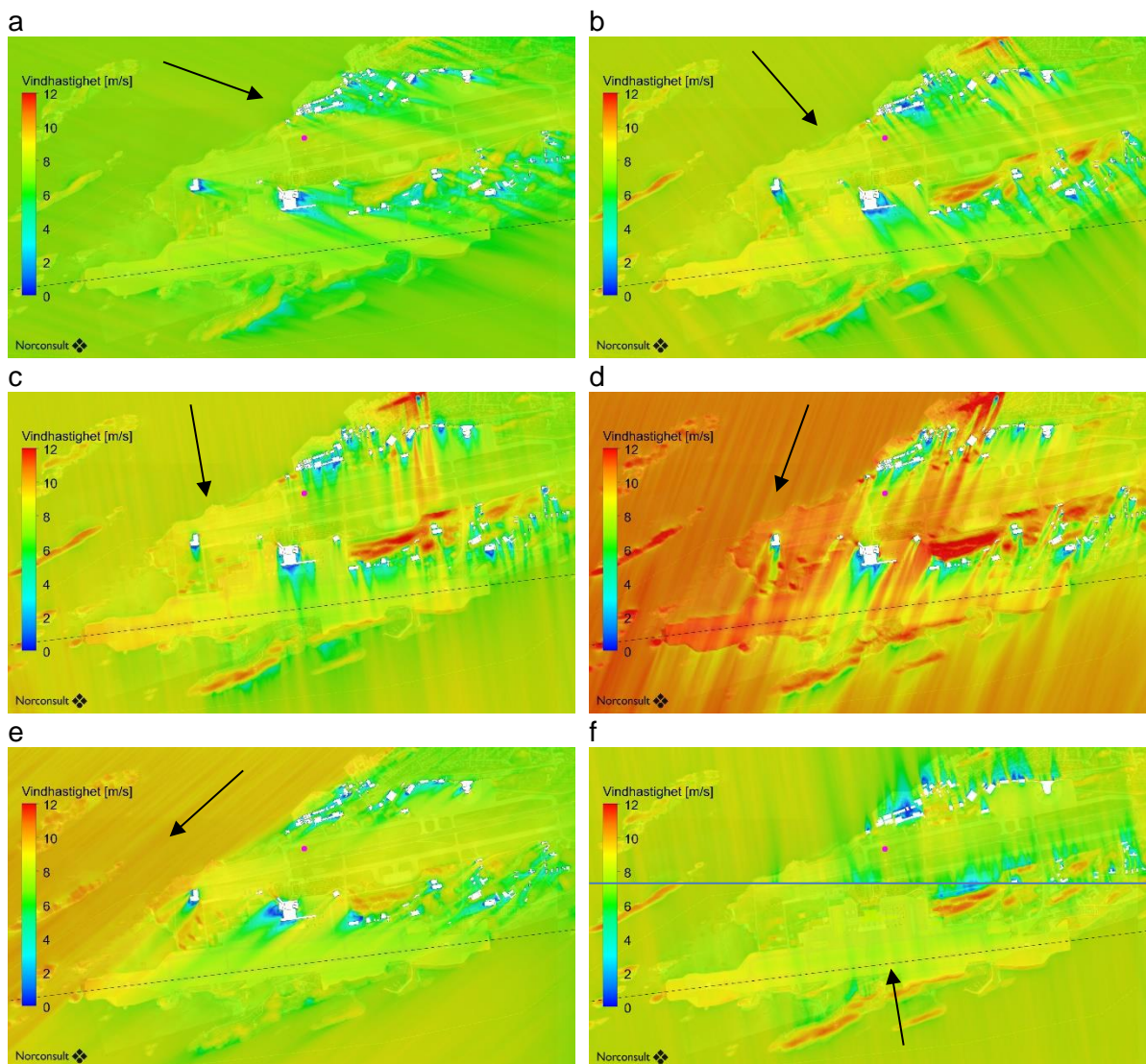
Tabell 3-8: Beregning av ved hvilken vindhastighet NLR-kriteriene for sidevind brytes, og hvor ofte dette inntreffer statistisk sett, for en evaluering med «totalutslag»

NLR-kriterium for sidevind – totalutslag							
Sektor	290 ± 15	320 ± 15	350 ± 15	20 ± 15	50 ± 15	170 ± 15	Sum
Kritisk hastighet [m/s]	20,0	19,1	16,0	12,7	37,6	35,4	
Overskridelser [timer/år]	1,2	0,2	0,3	0,2	0,0	0,0	2,0



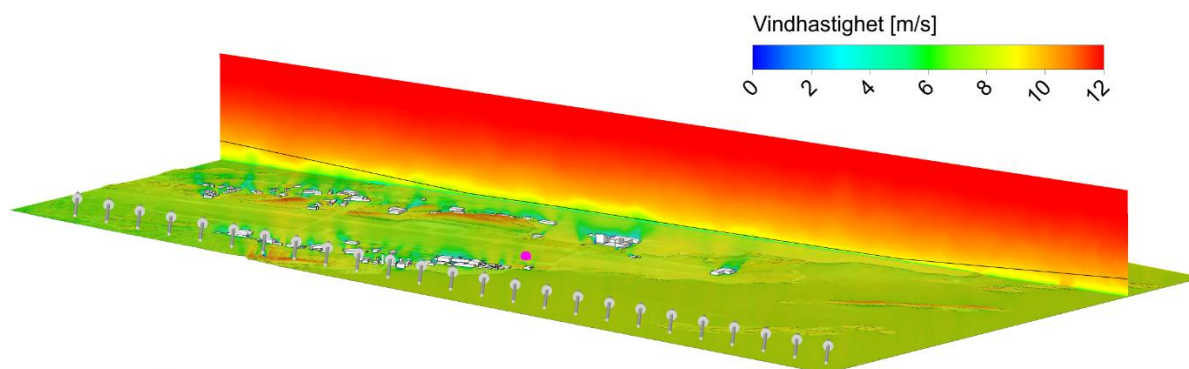
Figur 3-11: Sidevindhastighet langs innflyging (fra begge sider) og 10 m over rullebanen, for vindretninger fra 290°, 320° og 350° (normalt på rullebane), 20, 50° og 170° (normalt på rullebane fra sør). Vest mot venstre og øst mot høyre. Rullebanens midtpunkt ligger ved x = 0 og tersklene ligger ved x = ± 1 300 m. Stiplede linjer og fargede soner viser avlest maks vindendring (grønn er ensidig utslag og lilla er totalutslag).

Horisontalplott av vindhastighet i 10 meter høyde over lokalt terreng er vist i figur 3-12. Figurene er skalert slik at det er 8 m/s middelhastighet ved vindmåleren ved eksisterende flyplass (rosa sirkel). Siden måleren for flere vindretninger ligger i vaker av byggene på nordsiden, varierer vindhastigheten i området mye i forhold til hva som måles på stasjonen. Dette er også tilfelle for den nye rullebanen.» Le-virkningen rundt måleren er spesielt stor for vind fra 20 grader og at 8 m/s ved måleren svarer til en betydelig høyere vindhastighet ellers i området. Det er soner med redusert vindhastighet bak byggene, og spesielt terminalbyggene, samt bak Rishaugen.



Figur 3-12: Vindhastighet 10 m over lokalt terreng, skalert til 8 m/s ved eksisterende vindmåler (rosa sirkel). Vist for vind fra 290° (a), 320° (b), 350° (c), 20° (d), 50° (e) og 170° (f). Vindretning er angitt med svart pil.

Figur 3-13 viser et vertikalsnitt langs rullebanens senterlinje, med flylinjen inntegnet. Plottet er vist uten perspektivvirkning og sett i vindretningen for lettere å kunne se hvilke objekter som påvirker vindstyrken nedstrøms. Det er interessant å legge merke til hvordan den generelle hastighetsendringen med høyde, altså det atmosfæriske grensesjiktet, er relativt stor i forhold til bygningsvakene.



Norconsult

Figur 3-13: Lengdesnitt av vindhastighet for vindretning 320° og 8 m/s ved vindmåler (rosa sirkel)

3.6.4 Endring i motvind (nesevind)

Linjeplott for motvind er vist i figur 3-14. Vinden er definert positiv i vanlig landingsretning, altså *mot vinden*. I tilfelle landing *med vinden* representerer kurvene endring i «halevind» og må eventuelt inverteres for å beskrive motvind/nesevind.

På samme måte som for sidevinden viser blå linje middelvind. Oransje linje er basert på de samme dataene, men glattet for å fjerne raske endringer i vindfeltet, mens grå linje viser «bakgrunnsnivået». Legg for øvrig merke til at utslagene naturlig nok varierer svært mye med vindretning. Det er benyttet konstant skalering langs y-aksene i figurene slik at denne effekten trer tydelig fram.

Variasjonene i motvind likner til en viss grad på variasjonene i sidevind, ved at de kommer på samme steder og har liknende utbredelse. De store unntakene fra dette finnes ved vind normalt på rullebanen hvor motvinden svinger rundt null og med svært lave verdier.

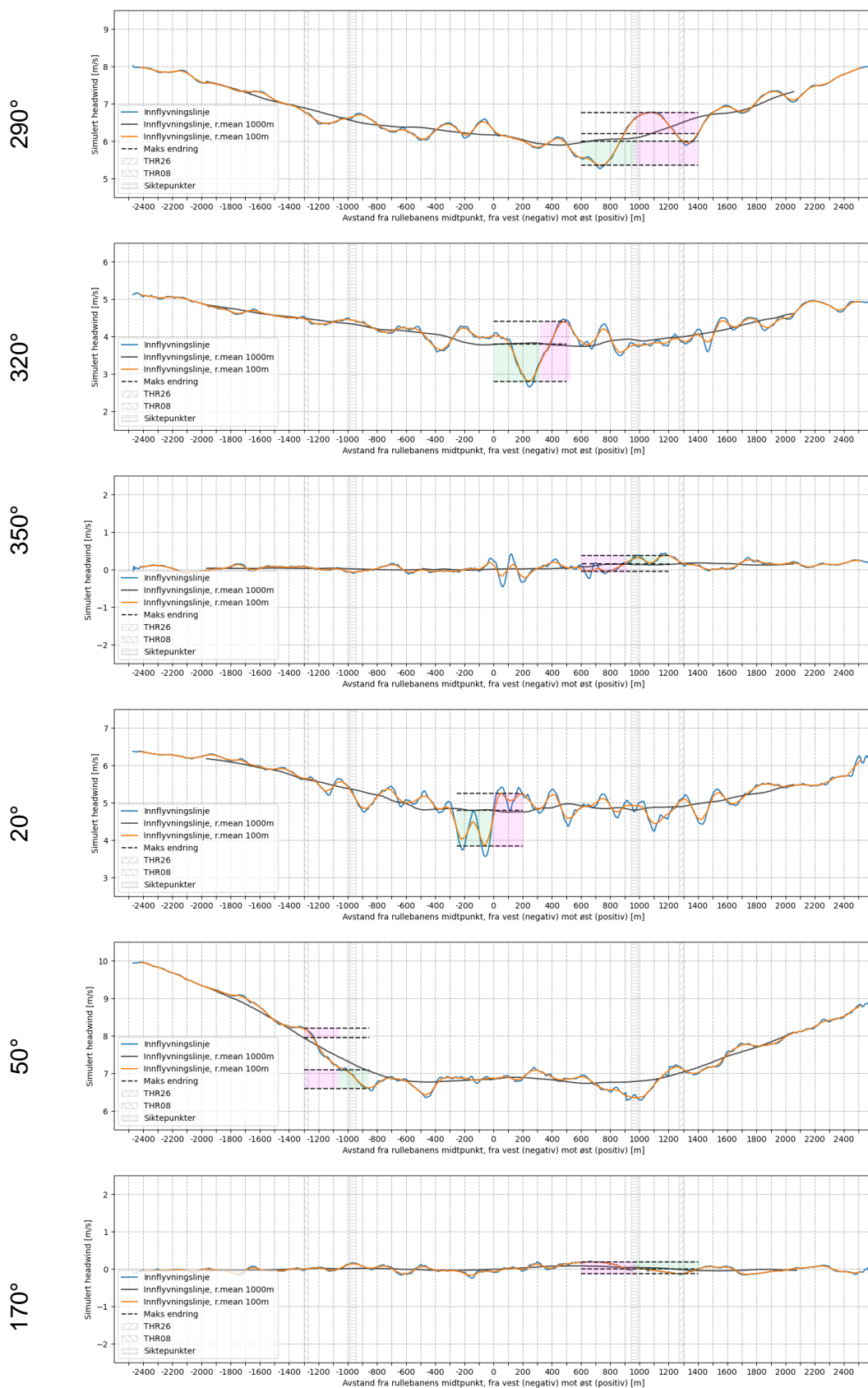
Tabell 3-9 og tabell 3-10 oppsummerer de statistiske evalueringene for motvind. En ser at det er funnet hhv. ingen overskridelser når vurderingen gjøres for ensidig utslag, mens det er 0,7 timer overskridelser per år hvis en ser på totalutslag. Det største bidraget finnes ved vind fra 320°.

Tabell 3-9: Beregning av ved hvilken vindhastighet NLR-kriteriene for motvind brytes, og hvor ofte dette inntreffer statistisk sett - evaluering for «ensidig utslag».

NLR-kriterium for motvind – ensidig utslag							
Sektor	290 ± 15	320 ± 15	350 ± 15	20 ± 15	50 ± 15	170 ± 15	Sum
Kritisk hastighet [m/s]	45.0	28.8	125.2	30.3	57.6	144.0	
Overskridelser [timer/år]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0

Tabell 3-10: Beregning av ved hvilken vindhastighet NLR-kriteriene for motvind brytes, og hvor ofte dette inntreffer statistisk sett – evaluering for «totalutslag».

NLR-kriterium for motvind – totalutslag							
Sektor	290 ± 15	320 ± 15	350 ± 15	20 ± 15	50 ± 15	170 ± 15	Sum
Kritisk hastighet [m/s]	23.8	18.0	68.6	20,6	38,4	90,0	
Overskridelser [timer/år]	0,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7



Figur 3-14: Motvind langs innflyging (fra begge sider) og 10 m over rullebanen, for vindretninger fra 290°, 320° og 350° (normalt på rullebane fra nord), 20, 50° og 170° (normalt på rullebane fra sør). Vest mot venstre og øst mot høyre. Rullebanens midtpunkt ligger ved x = 0 og tersklene ligger ved x = ± 1 300 m. Stiplede linjer og fargede soner viser avlest maksimal vindendring (grønn er ensidig og lilla er totalutslag).

3.6.5 Vertikalvind

Det er lite vertikalvind langs flylinjen og verdien ligger innenfor $\pm 0,5$ m/s ved referansevind ved eksisterende vindmåler på 8 m/s. Linjeplot av vertikalvinden er vist i Vedlegg B: Linjeplot av vertikalvind.

3.7 Diskusjon

3.7.1 Innspill fra brukere

Den 28. februar 2020 ble det arrangert et møte med brukerne av dagens lufthavn. Til stede var representanter for SAS og Widerøe. Norwegians interesser var avtalt ivaretatt av SAS. Det ble diskutert både forhold ved eksisterende rullebane og foreløpige resultater for NLBO.

Brukerne anså ikke turbulens som et problem ved nordlig vind per i dag, men hevdet at sterk nordlig vind kunne være problematisk ved glatt rullebane. Det ble i den sammenheng kort diskutert at nordlig vind var så sjelden at det var usikkert hvor mye erfaring de egentlig hadde med dette, til tross for svært lang fartstid ved Bodø lufthavn.

SAS reagerte ikke på plassering av terminalbygninger ut fra tegninger og CFD-modell. Det ble trukket fram at «737» som regel lander i nærheten av siktepunkt og at endring i sidevind var mest kritisk i «flare» (altså rett før «touch down»). Widerøe tilpasser på sin side hvor de lander etter vær og takse-distanse.

Ut fra de de presenterte, foreløpige resultatene ble det kommentert at lokasjonen endringer i vinden treffer rullebanen er viktig. Vind fra 20° så f.eks. ut til å kunne gi problemer i nærheten av terskel som igjen kan være utfordrende, mens endringer i sidevind nærmere midten av rullebanen ble ansett som mindre problematisk. Representantene fra SAS og Widerøe rapporterte begge at luften over Bodø generelt var turbulent ved sørlig vind sannsynligvis er generert av fjellene i sør.

Det knyttes følgende kommentarer til ovenstående:

- Norconsult anser at aspektet med turbulens i høyden over Bodø ligger utenfor temaet i denne rapporten. Det antas uansett at dette endres lite ved flytting av rullebanen 900 meter mot sør når kilden til turbulensen ligger så lang unna.
- I møtet ble det presentert tidligere bygningsutkast, men med tilsvarende proporsjoner som i denne rapporten, og brukernes vurdering om plassering av terminalbyggene antas å stå seg fortsatt.
- Det var foreløpige resultater med annen simuleringmodell (RANS) og andre bygg som ble presentert, men det er ikke store vindendringer ved terskel for vind fra 20° ved de siste simuleringene.

Som nevnt i kapittel 3.4.3 har det høsten 2020 også vært samtaler mellom Avinor og brukerne rundt tolkning av NLR-kriteriet. I disse samtalen har det blitt vurdert at «ensidig utslag» virker å være mest i samsvar med brukernes erfaring. Dette baserer seg på en forståelse av at det kritiske aspektet er om det er tilstrekkelige kontrollressurser (hastighet/motorkraft/rorautoritet) tilgjengelig til å holde flyet på planlagt innflygingstrasé (lateralt og vertikalt) innenfor akseptable toleranser. Det er således ikke så mye relativ endring av vinden, men faktisk verdi av utslaget som er avgjørende.

Widerøe har i tilbakemeldingen til resultatene som presenteres i rapporten kommentert: «Vind og turbulens simuleringene ser greie ut. WF har ingen innspill til disse utover at vi ikke tror disse faktorene blir et større problem på ny lufthavn enn på den nåværende».

Den generelle tilbakemeldingen fra brukere er at planene for NLBO vurderes å ikke representere noen spesielle utfordringer med hensyn til vind.

3.7.2 Avinors varslingsmetodikk for turbulens

Tabell 3-4 viser estimat for overskridelser av Avinors varslingsgrense for turbulens ved dagens rullebane, mens tabell 3-6 viser tilsvarende resultater for beregningene for NLBO.

Det virker ut fra disse resultatene som om turbulensnivået blir tilsvarende eller noe lavere ved NLBO enn ved dagens rullebane.

Noen overskridelser kan forekomme for svært høye vindhastigheter, men dette vurderes å være tilfelle i praksis for alle flyplasser. Turbulensnivået i det atmosfæriske grensesjiktet over åpent terreng vil vanligvis være høyt nok (15-20 %) til å nå grenseverdiene når vinden overstiger rundt 20 m/s.

Turbulensen langs bakken har derimot liten lengdeskala og fluktuationene/vindkastene liten utstrekning. Det samme turbulensnivået i \sqrt{TKE} vil derfor sannsynligvis ha mindre innflytelse på et fly langs bakken enn i større høyde.

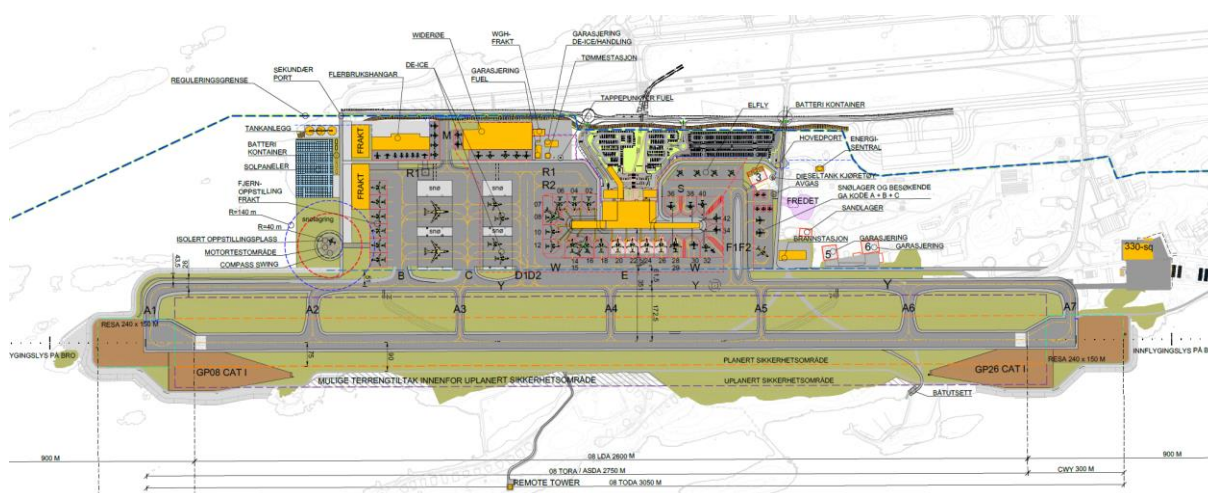
Det vurderes at turbulensen ligger på akseptabelt nivå for eksisterende planer for NLBO.

3.7.3 Helhetsplan 2065

Eksisterende helhetsplan for 2065 er vist i figur 3-15. Planen inkluderer noen flere bygninger langs nordlig side av lufthavnen.

Det er ikke utført noen simuleringer for denne situasjonen, men ut fra kunnskap bl.a. opparbeidet i forprosjektet, virker det lite sannsynlig at disse bygningene vil skape noen spesielle problemer med hensyn til vind. Denne vurderingen baseres på at det er stor avstand fra bygg til rullebane, større enn avstanden mellom terminalen og rullebanen. Det er her antatt at hangarene (og fraktbygningene) typisk er opptil 11 - 12 meter høye, uten at dette er en definert grense.

Det er sannsynlig at det vil være en rekke bygninger utenfor lufthavnen på nordsiden i 2065. Disse vil nødvendigvis også kunne påvirke situasjonen, gjerne i positiv retning hvis byggene ikke er spesielt høye. Virkningen av disse er det umulig å ta hensyn til uten å kjenne noen detaljer for disse byggene, men det vurderes ikke å være grunn til bekymring for framtidige utbygninger her.



Figur 3-15: Helhetsplan for 2065

3.8 Konklusjon

Rådgiver vurderer at turbulens og lokale vindendringer ved NLBO er akseptable slik planene for lufthavnen foreligger per i dag. Vurderingen er basert på simuleringer og analyser, innspill fra brukere og diskusjoner med Avinor.

4 TÅKE

4.1 Innledning

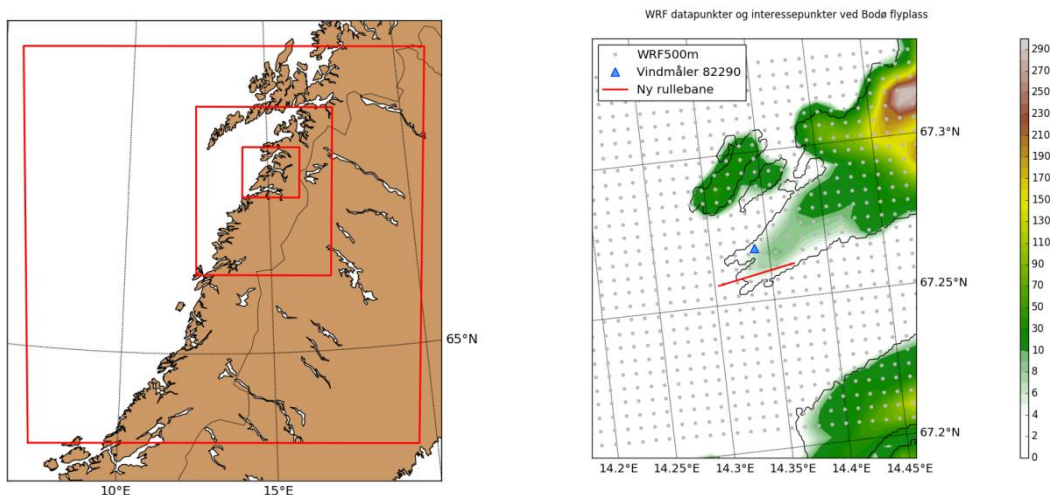
MET har vurdert mulighet for havtåke om sommeren til å endres marginalt fra dagens rullebane til planlagt rullebane [1]. For å kaste mer lys over denne problematikken har KVT undersøkt finskala resultater fra en meteorologisk værvarslingsmodell (Weather Research and Forecasting model, WRF). Tåke kan forekomme hele året, men for området rundt Bodø er det spesielt havtåke om sommeren som kan være av interesse. Dette fenomenet opptrer når fuktig og varm luft ligger over kaldt hav og vil kunne være problematisk hvis den siger inn over rullebanen.

4.2 WRF

I forbindelse med arbeid for Statens Vegvesen i Leirfjorden har KVT meteorologiske simuleringer med høy oppløsning tilgjengelig- horisontal oppløsning på 500 x 500 meter og 51 vertikale lag (videre referert som WRF500m). Mellom bakken og 200 meter har modellen åtte lag, det nederste er sentrert ca. 13 meter over hav/terreng. WRF-modellen er kjørt for ett år, og data er gitt hver time. Dette gir mulighet til å vurdere fordelingen av lave skyer for det spesifikke året.

WRF-modellen benyttet her er v3.2.1 [6], og er satt opp med fire domener med oppløsning på henholdsvis 22,5 km, 4,5 km, 1,5 km og 500 meter. De innerste domenene er vist i figur 4-1, der også en mer detaljert oversikt over datapunkter nær flyplassen er gitt. Grenselags-skjemaet som er benyttet er MYJ, og type arealbruk er satt i henhold til Kartverkets N50-data. Modellen er konfigurert med geografiske data fra National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), som for eksempel topografidata, albedodata og vegetasjon. Modellen drives av randbetingelser fra ERA-Interim reanalysen, som har ca. 0,7 graders oppløsning – tilgjengelig fra European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) med 6-timers intervaller.

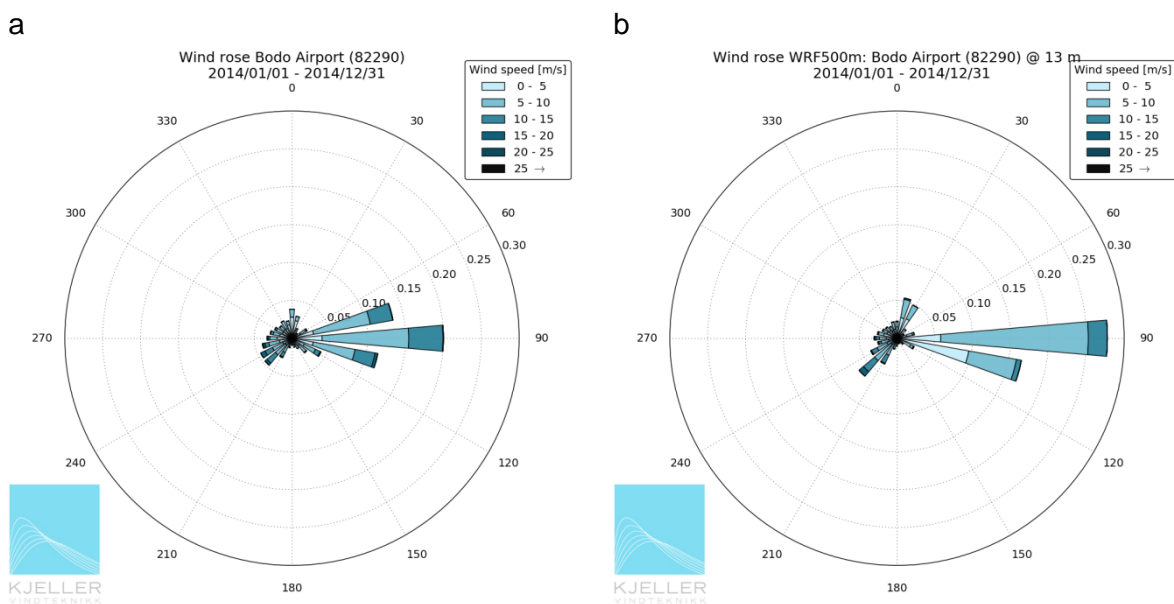
Det er viktig å presisere at simuleringen kun dekker ett år, slik at mellomårlege variasjoner ikke fanges opp. Dette betyr at modellresultatene kun kan benyttes som indikasjon på mulige romlige variasjoner.



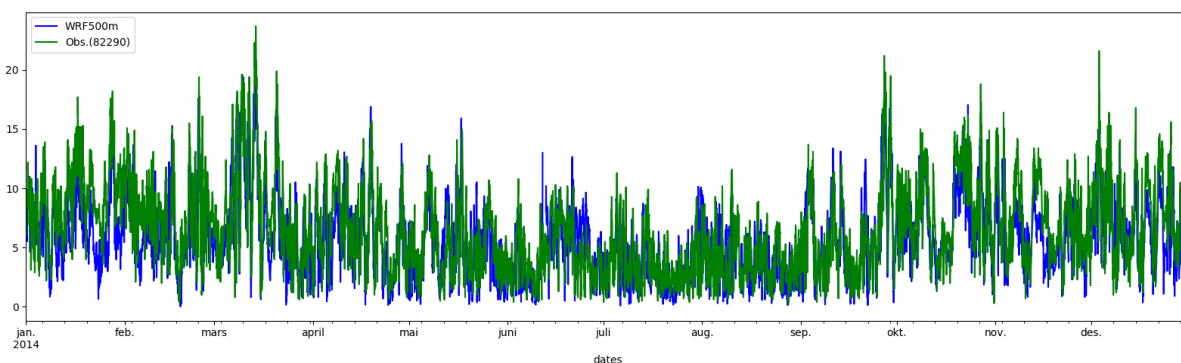
Figur 4-1: Oversiktskart over de tre innerste domenene i WRF-simuleringen utført av KVT (venstre) og oversikt over datapunkter for analyse (høyre). Fargeskala på høyre side viser modellens topografi (fargeskala gitt i meter).

4.3 Vind i WRF

En vindrose for observert vind i 10 meters høyde ved vindmåler nummer 82290 (Bodø lufthavn) er vist i figur 4-2, sammen med vindrose fra det nederste modellnivået (ca. 13 meter) i WRF500m-datasettet. Sammenfallende tidspunkter er valgt, og det kan sees at vinden representeres godt. Noen ulikheter er riktignok forventet på grunn av terrengoppløsningen i WRF500m. Tidsserier av vindhastighetene er gitt i figur 4-3, og det sees at modellert og observert vind følger hverandre forholdsvis godt.



Figur 4-2: Observert (a) og modellert (b) vindrose ved Bodø lufthavn



Figur 4-3: Tidsserie av observert (82290 @ 10 m) og modellert (WRF500m @ 13 m) vind

4.4 Skyvann i WRF

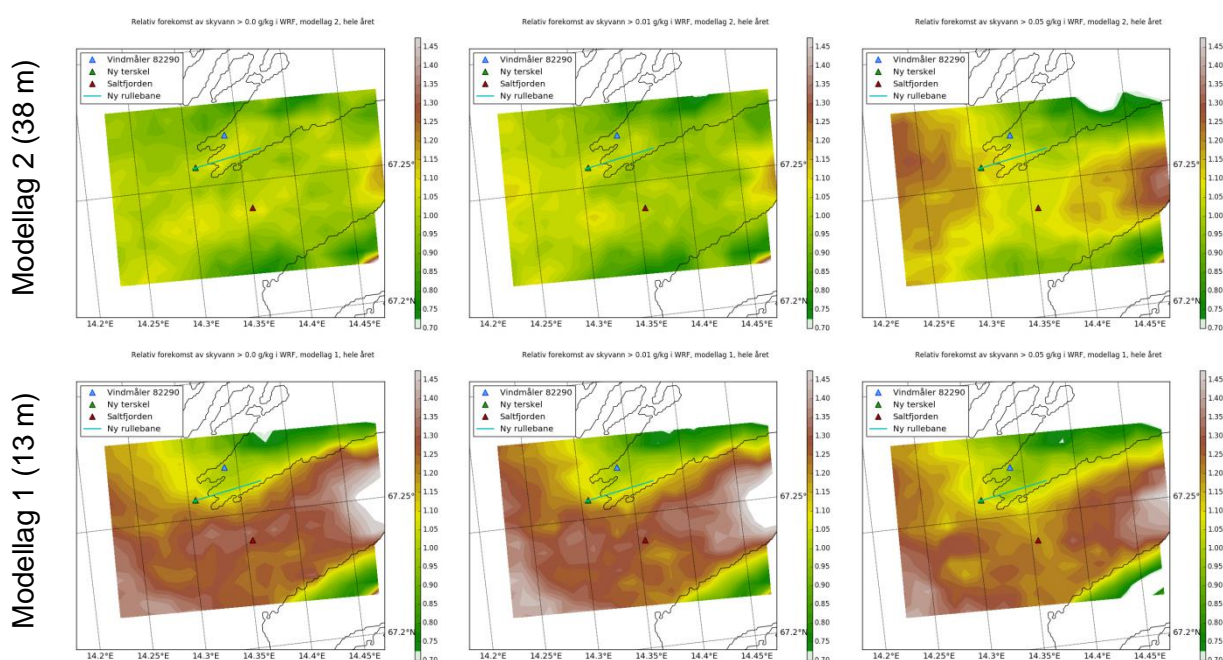
Skyer dannes når små dråper i luften blir store og mange nok. I en værvarslingsmodell er skydannelse parametrisert, og det kan ikke forventes en like god reproduksjon av observasjoner som vist for vind. Målinger er dessuten ikke tilgjengelige for sammenligning. En parametrisering er avhengig av tilgjengelig fuktighet og temperatur, noe som kan forventes å ha en god romlig fordeling siden vindhastighet og vindretning er godt representert i modellen.

En typisk verdi for skyvann når det er tåke, er $0,05 \text{ g/m}^3$, eller $0,05 \text{ g(H}_2\text{O)/kg(luft)}$. I en modell kan dette være en noe høy verdi på grunn av modellopløsningen, så det er derfor testet flere grenseverdier. For modellaget nærmest bakken er det i hvert gridpunkt beregnet

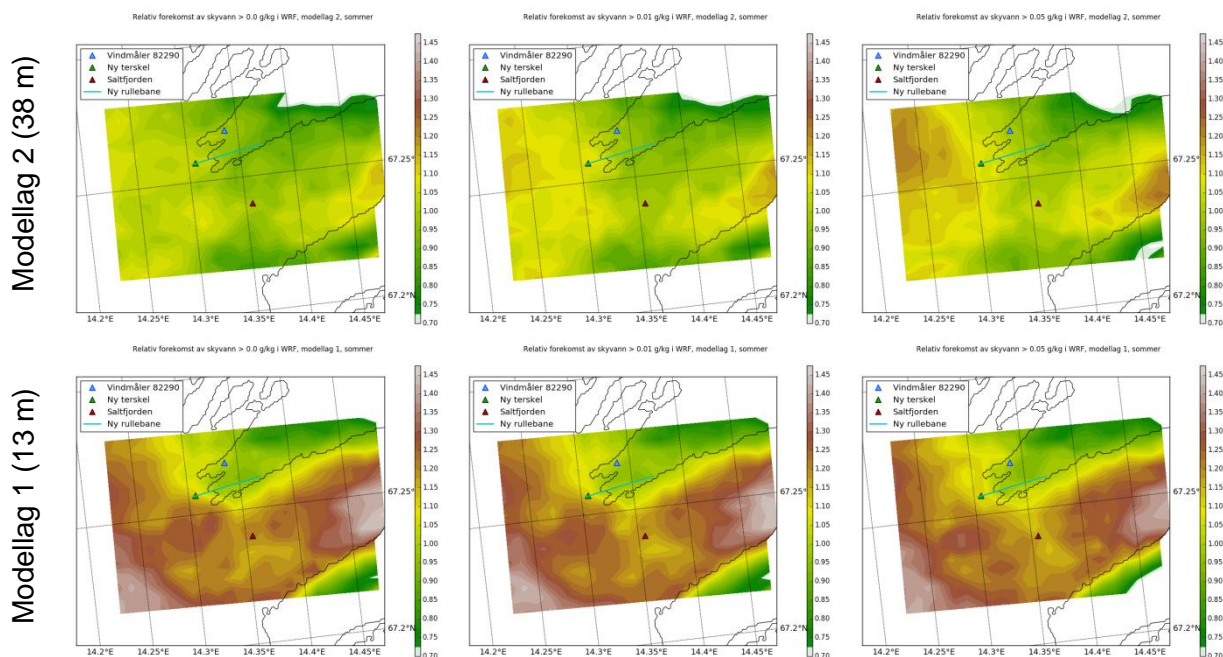
antall forekomster av skyvann over grenseverdiene 0 g/kg, 0,01 g/kg og 0,05 g/kg. Deretter er forekomstene normalisert til gridpunktet med høyest forekomst. Resultatet vises i figur 4-4 for hele året og i figur 4-5 for sommeren (mai-september). Det er generelt liten forskjell på dagens rullebane og den nye rullebanen, med unntak av området lengst vest. Den vestre delen av ny rullebane ligger lenger ut i sjøen og her antyder modellen en økt forekomst av skyer nærmest bakken, både når vi ser over hele året og for sommeren. For det nest nederste modellaget (38 meter) sees det samme for skyvann over 0,05 g/kg, mens det er liten forskjell for lavere grenseverdier av skyvann.

Antall timer med skyvann over de undersøkte grenseverdiene er vist for tre steder i tabell 4-1; for målemast 82290, terskel THR08 og for et punkt i Saltfjorden (som vist i figur 4-4 og figur 4-5). En viss økning i forekomst av skyvann og dermed tåke er derfor mulig ved den vestre delen av rullebanen. Denne endringen er likevel overestimert i disse resultatene, siden ny rullebane vil ligge på en fylling og ikke over kaldt hav. Siden WRF500m benytter dagens terreng, vil datapunkter for den vestre delen av ny rullebane ligge ute i sjøen. Når rullebanen er ferdig er det imidlertid ikke sjø lenger, men siden fyllingen er forholdsvis smal er det ikke sikkert de nye landmassene påvirker tåken i nevneverdig grad.

Anslått økning i tilfeller med tåke på deler av rullebanen vil være 0 % - 10 %, hvor økningen i hovedsak antydes i vest. For den øvrige delen av rullebanen støtter WRF500m-resultatene konklusjonen til MET om marginal endring i havtåke. For å redusere usikkerhetene kunne det være mulig å sammenligne modelldataene med observert sikt, eller registrerte hendelser med tåke.



Figur 4-4: Relativ forekomst av WRF-skyvann (relativt til gridpunktet med høyest forekomst) over gitte grenseverdier, for hele året. Øverst vises modellag i 38 m høyde og nederst modellag i 13 m høyde. Grenseverdiene er 0 g/kg (venstre), 0,01 g/kg (midten) og 0,05 g/kg (høyre).

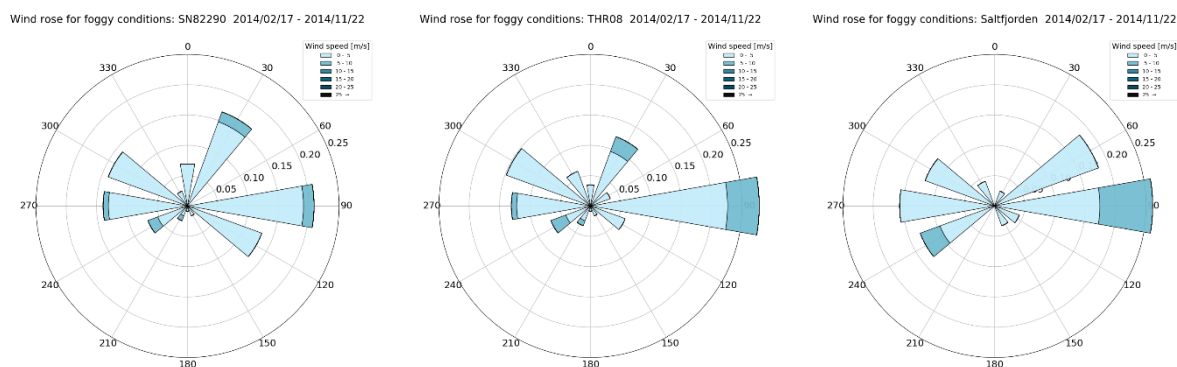


Figur 4-5: Relativ forekomst av WRF-skyvann (relativt til gridpunktet med høyest forekomst) over gitte grenseverdier, for sommeren (mai-september). Øverst vises modellag i 38 m høyde og nederst modellag i 13 m høyde. Grenseverdiene er 0 g/kg (venstre), 0,01 g/kg (midten) og 0,05 g/kg (høyre).

Tabell 4-1: Antall timer for WRF500m med skyvann over grenseverdier (LWC, i g/kg), for hele året 2014 og for sommeren 2014

WRF-punkt	Timer hele året 2014			Timer om mai-september 2014		
	LWC > 0,00	LWC > 0,01	LWC > 0,05	LWC > 0,00	LWC > 0,01	LWC > 0,05
Målemast 82290	77	72	64	63	62	59
THR08	88	82	71	70	69	66
Saltfjorden	99	92	78	76	73	70

Ved å velge ut vindstyrke og vindretning ved skyvannforekomst høyere enn terskelverdier, kan det lages «tåkeroser», dvs vindroser som gjelder for tåkeforhold. Dette er vist i figur 4-6 for LWC > 0,05 g/kg. For THR08 er det noe færre tilfeller fra nordøst, men flere fra østlig vind. For måler 82290 er median vindhastighet i det nederste modellaget (12,5 m) 2,4 m/s og maks vindhastighet 5,8 m/s. For THR08 er median vindhastighet 2,7 m/s og maks vindhastighet 6,6 m/s.



Figur 4-6: Vindrose for forhold med skyvann i modellens lag nærmest bakken

5 BIBLIOGRAFI

- [1] J. Mamen, H. Mc Innes og K. H. Midtbø, «Analyse av eventuell endring av værmessig tilgjengelighet ved flytting av Bodø lufthavn, MET report no. 15/2016,» Meteorologisk institutt, 2016.
- [2] J. Mamen, H. Mc Innes og K. H. Midtbø, «Notat: Vurdering av risiko for bølger og ising ved flytting av Bodø lufthavn,» Meteorologisk institutt, 2018.
- [3] Norconsult, «Ny lufthavn Bodø - Sjøbelastning, 10001444-187075-BO000-G3-RA-0001», 2019.
- [4] K. Harstveit, «Full scale measurements of gust factors and turbulence intensity, and their relations in hilly terrain,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 61, 195-205, 1996.
- [5] A. Nieuwpoort, J. Gooden og J. de Prins, «Wind criteria due to obstacles at and around airports,» National Aerospace Laboratory NLR, Amsterdam, 2010.
- [6] W. C. Skamarock, J. Klemp, J. G. D. O. Dudhia, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang og W. P. J. G. Wang, «A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, Boulder, June 2008,» NCAR, 2008.

6 VEDLEGG

6.1 Vedlegg A: Large Eddy Simulation

I dette vedlegget beskrives en del forhold rundt turbulensmodelleringen som er benyttet i analysen. Det er forsøkt å beskrive metodevalg slik at det skal være mulig å forstå for lesere uten dybdekunnskap innen fagfeltet.

Litt bakgrunn om turbulens

For å forklare metodene som er benyttet i dette arbeidet, er det nyttig å beskrive noen generelle konsepter rundt begrepet «turbulens».

Vind varierer i tid og rom som følge av:

- meteorologiske forhold
- påvirkning av geometri (terreng og bygninger)
- turbulens

Turbulens defineres som relativt kortvarige variasjoner i vindens styrke og retning som inntreffer tilsynelatende tilfeldig. Disse variasjonene, slik de registreres av en vindmåler, omtales på fagspråket som turbulente «fluktuasjoner». Når en betrakter et helt felt med turbulens forklares strukturen i strømmingen gjennom «turbulente virvler», også kjent som «eddier» («eddy» i entall), som har ulik «tidsskala» og «lengdeskala» (karakteristisk utbredelse i tid og rom).

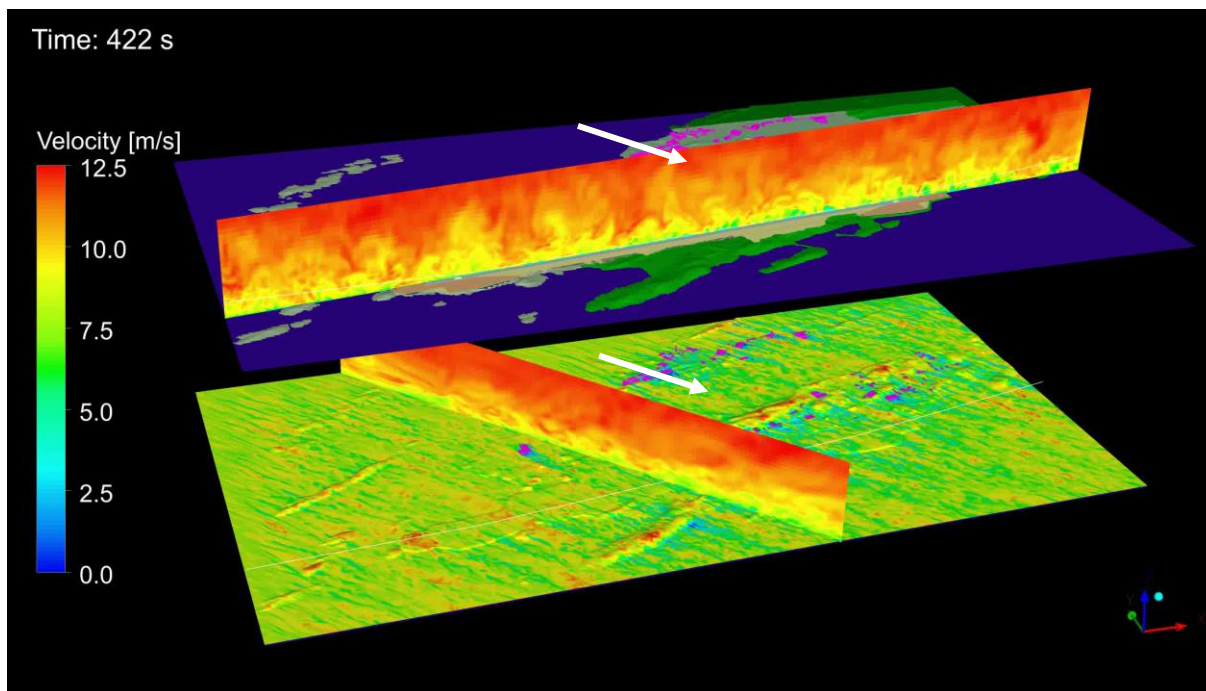
I lav høyde over bakken kan slike turbulente fluktuasjoner skje typisk innenfor perioder på få sekunder til minutter. Varigheten er generelt sett kortere desto høyere vindhastigheten er. Turbulens inkluderer det vi til daglig refererer til som «vindkast». Vindkast er egentlig en del av en turbulent fluktusjon hvor vindhastigheten er høy i en kortere periode.

Ved meteorologiske vindmålinger er det vanlig å regne ut og rapportere «middelvinden» for et tidsrom på 10 minutter. At det er valgt å representere vinden som et gjennomsnitt over en periode med akkurat denne lengden, skyldes at en ønsker å skille mellom meteorologiske variasjoner (>10 min) og turbulente fluktuasjoner. Dette er en forenkling og fenomenene kan overlape hverandre i mange tilfeller.

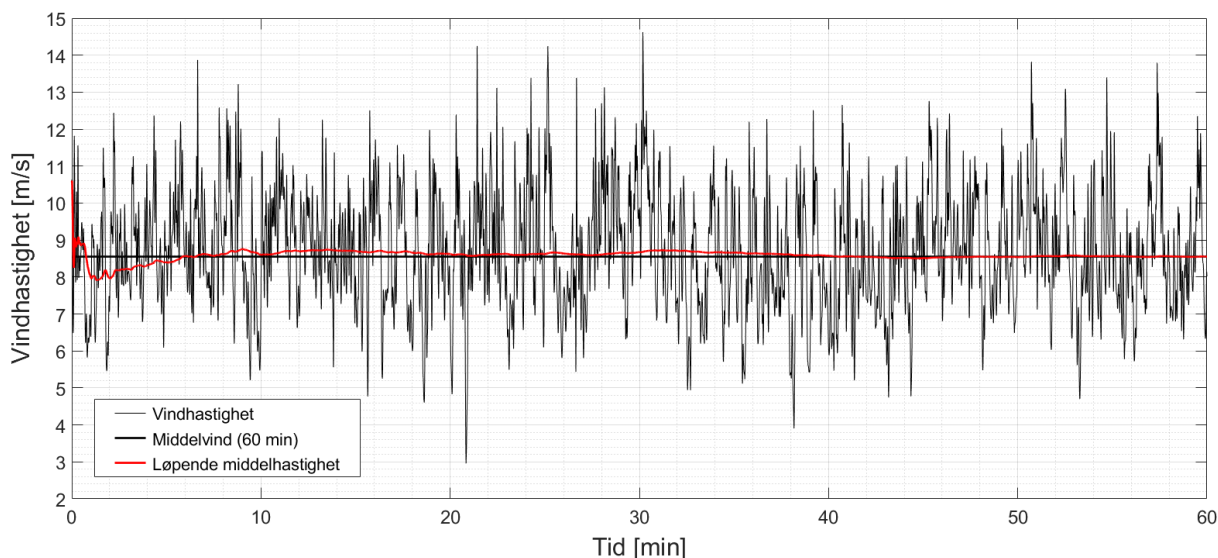
I tillegg til middelvinden beregnes det i mange tilfeller også statistiske verdier for turbulensen. Den turbulente vindhastigheten som inngår i disse beregningene, er vindens avvik fra den beregnede middelvinden. Dette avviket kvantifiseres oftest ved å regne ut RMS-verdien, også kjent som standardavviket. Dette kan sies å representere en typisk størrelse for de turbulente fluktuasjonene, mens det vi oppfatter som vindkast gjerne representerer utslag fra middelvinden på 2-3 standardavvik.

For å illustrere turbulens viser Figur 6-1 et øyeblikksbilde for et vindfelt fra beregningene i denne rapporten. En ser her at turbulensen (altså variasjonene i hastighet) består av strukturer hvor virvlene har minst utbredelse («lengdeskalaer») langs bakken, mens de blir større med høyde.

Figur 6-2 viser tidshistorikken fra simuleringen for vinden i ett enkelt punkt. Den svarte vannrette linjen er middelverdien fra simuleringen og turbulensen er altså definert som svingningene rundt denne linjen. Den røde linjen viser middelverdien som funksjon av midlingstid – en ser her at en får en relativt god midling etter 10 minutter, men at det er først etter rundt en time at verdien er helt konstant og sammenfaller med svart linje.



Figur 6-1: Øyeblikksbilde for turbulent vindfelt. Vinden blåser i den hvite pilens retning og hastigheten er vist langs rullebanen (øverst) og langs vindretningen samt i 10 meters høyde over bakken (nederst)



Figur 6-2: Tidshistorikk for den øyeblikkelige vinden i ett punkt (langs rullebanen)

Turbulensmodellering innen CFD (Computational Fluid Dynamics)

Ved CFD-simuleringer løses Navier-Stokes' likninger som beskriver balansen av kreftene som styrer bevegelsen av fluider generelt, altså i dette tilfellet luft. Kreftene det er snakk om er akselerasjonskrefter, trykkrefter, viskøse krefter («friksjon») osv.

Simuleringene settes opp ved at det først bygges en geometrisk datamodell av området som undersøkes. Volumet av fluid som inngår i beregningen deles så inn i små beregningsceller (se kapittel 3.5.2 for hvordan dette er utført i analysen). Datamaskiner løser likningene ved å tilnærme kraftbalansen i Navier-Stokes' likninger iterativt (ved gjentatte tilnærminger) i alle cellene samtidig.

Det store problemet med å benytte metodikken f.eks. for atmosfærisk vind er at turbulens finnes samtidig på små og store «lengdeskalaer» og «tidsskalaer». Dette betyr at en må ha svært mange beregningsceller og løse likningene med veldig små steg framover i tid. I sum gjør dette problemstillingen så kompleks at det ikke finnes datamaskinkapasitet til å gjøre en direkte simulering med alle skalaer for et så stort område som f.eks. en lufthavn.

Det må understrekes at dette ikke kun er av akademisk interesse, selv for en tilnærmet løsning av middelvinden er det nødvendig å beskrive turbulensen på en god måte. Den tradisjonelle måten å ta hensyn til dette på innen CFD er å «tidsmidle» Navier-Stokes' likninger, slik at de uttrykker kraftbalansen for middelvinden. De nye likningene som oppstår omtales med forkortelsen RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes'). Siden utstrekningen av lokale variasjoner i middelvinden er mye større enn utstrekningen av fluktuasjoner i turbulensen er slike beregninger betydelig mindre beregningskrevende.

Ved slik Reynoldsmidling oppstår det derimot nye ledd i likningene som representerer de statistiske bidragene av de turbulente fluktasjonene. Disse nye leddene beskriver hvilken virkning turbulensen har på middelvinden og modelleres vanligvis gjennom å legge til nye tilnærmede likninger for turbulensen – omtalt som turbulensmodeller. I praktiske prosjekter er det i dag vanligst å benytte «to-likningsmodeller» som f.eks. $k-\varepsilon$ og SST. Med uttrykket to-likningsmodell menes det at det er lagt til to likninger for å beskrive turbulensen.

Det er viktig å huske at turbulensmodeller alltid representerer betydelige forenklinger av turbulensen, og kan virke både bedre og dårligere for ulike strømningsfenomener.

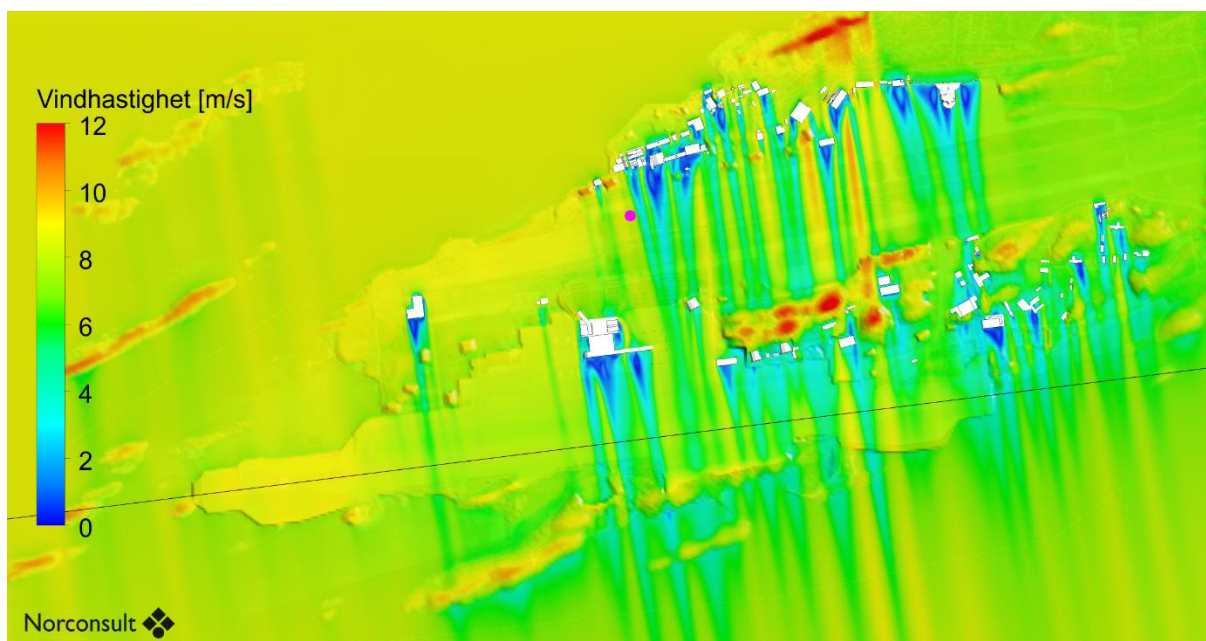
Testing av turbulensmodeller for NLBO

Simuleringer med RANS og to-liknings turbulensmodeller er i dag den vanligste metodikken for CFD-simuleringer av vindforhold. I svært mange tilfeller gir disse gode resultater for praktiske ingeniørformål. De første simuleringene for NLBO ble således utført med RANS og en SST to-liknings turbulensmodell.

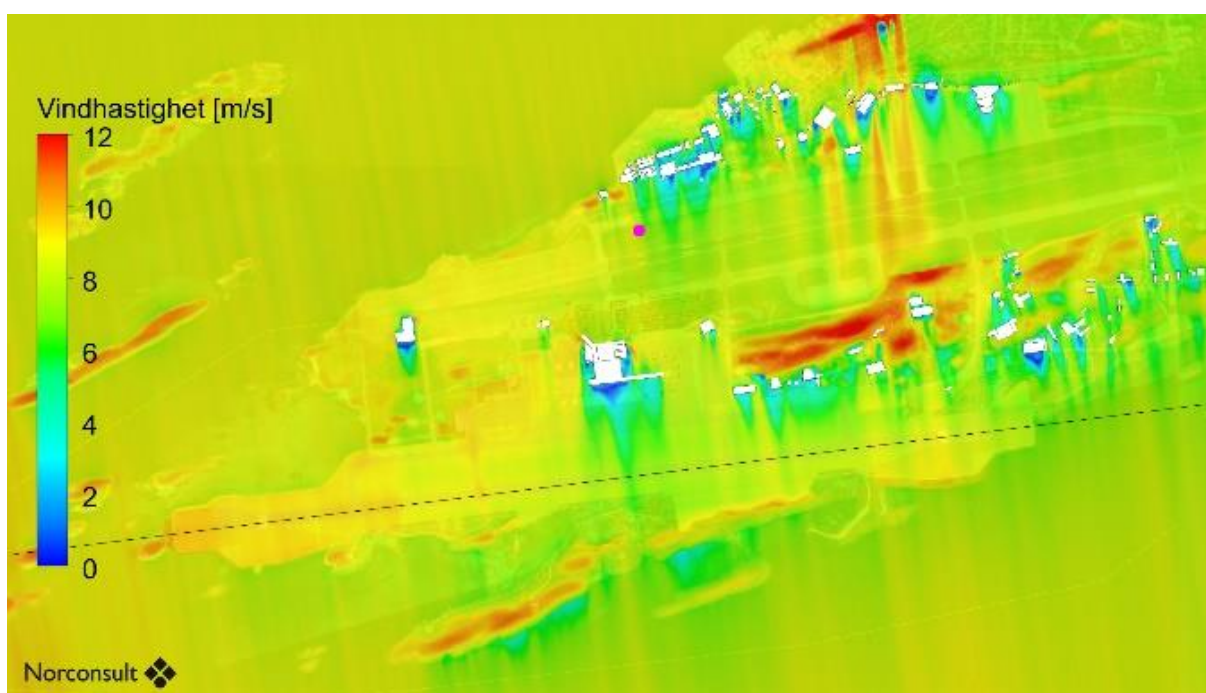
Figur 6-3 viser et eksempel på resultater for middelvind i 10 meters høyde med denne typen modelleringen. En ser at sonene med redusert vindhastighet bak bygningene (blålige områder) strekker seg svært langt nedstrøms.

For å undersøke dette fenomenet nærmere ble det testet å benytte en såkalt LES-modell (Large Eddy Simulation). I slike simuleringer løses de store turbulente virvlene/eddiene opp direkte i tid og rom. Slike simuleringer er beregningskrevende, men antas i utgangspunktet å være nøyaktigere enn RANS-modellering.

Figur 6-4 viser resultater fra LES-modelleringen. Utstrekningen av vakene bak byggene er her betydelig kortere og virker intuitivt mer korrekte. Ved evaluering av NLR-kriteriene vil denne forskjellen være helt avgjørende. Det ble valgt å benytte LES i dette arbeidet etter å ha gjort en «validering» gjennom en sammenlikning med relevante tilgjengelige målinger. I det neste avsnittet presenteres denne sammenlikningen nærmere.



Figur 6-3: Middelvind fra simulering med RANS-modell for NLBO



Figur 6-4: Middelvind fra simulering med LES-modell for NLBO (1 time midlingstid)

Testing av LES-modell for bygningsvake

Det er naturlig å tro at LES er riktigere enn RANS, men det var et behov for å undersøke og dokumentere dette nærmere før metodikken ble benyttet. Det ble først utført et litteratursøk, men konklusjonen fra dette er at det virker som om det er lite relevante fullskalamålinger for vind langt bak bygninger. Dette skyldes nok både at et slikt eksperiment er vanskelig og kostbart å instrumentere, og at de meteorologiske forholdene variere så mye at det er vanskelig å trekke ut virkingen av bygget på middelvind og turbulens isolert.

Vindtunnelforsøk med bygninger i modellskala er den tradisjonelle måten å undersøke slike forhold på, og disse antas i utgangspunktet å få med seg mye av fysikken fra fullskala. En

god del av det som er finnes er relativt gammelt, men stammer fra den gang de beste laboratoriene i verden.

Det ble valgt å teste simuleringer mot et slikt kjent vindtunnelforsøk som finnes i rapporten⁴:

*Woo, H. G. C., Cermak, J. E. and Peterka, J. A.: **Wind tunnel measurements in the wakes of structures**, George C. Marshall Space Flight Center / Colorado State University, NASA contractor report NASA CR-2806, National Aeronautics and Space Administration, Washington, 1977*

Det beskrives i rapporten et stort sett med forsøk for ulike bygningsmodeller og turbulente vindprofiler. Det ble valgt å benytte den av disse som liknet mest, gitt de forhold/vurderinger mot høyde på terminalen og tykkelsen på vindprofilet (grensesjiktet) som benyttes i simuleringene.

I dette eksperimentet (Test series 3, Model 2, Approach Flow Condition 4) var grensesjiktets tykkelse $\delta=1,37$ m og «bygningens» høyde $H = 6,5$ cm, bredde $W=15,88$ cm og dybde (i vindretningen) $D=4,88$ cm.

I simuleringene for NLBO er grensesjiktets tykkelse $\delta=500$ m. Bygningen fra forsøket har derfor effektiv størrelse $H=23,7$ m, $W=58$ m og $D=17,8$ m. Dette kan sies å være av samme størrelsesorden som terminalen ved NLBO, og forsøket anses derfor som godt egnet for sammenlikning.

Figur 6-5 viser beregnet vindhastighet i et plan med RANS-simuleringen øverst. I midten vises et tilfeldig valgt øyeblikksbilde fra LES, mens tidsmiddelet for hele simuleringssperioden fra LES vises nederst. En ser at beregnet wake er langt kortere med LES-modellen enn med RANS, og intuitivt virker mer korrekt.

Figur 6-6 viser de samme simuleringene med konturplott for et snitt midt gjennom bygningen. En ser her at selv om de ytre delene av strømmingen tilsynelatende likner, er det betydelig forskjell nedstrøms bygningen.

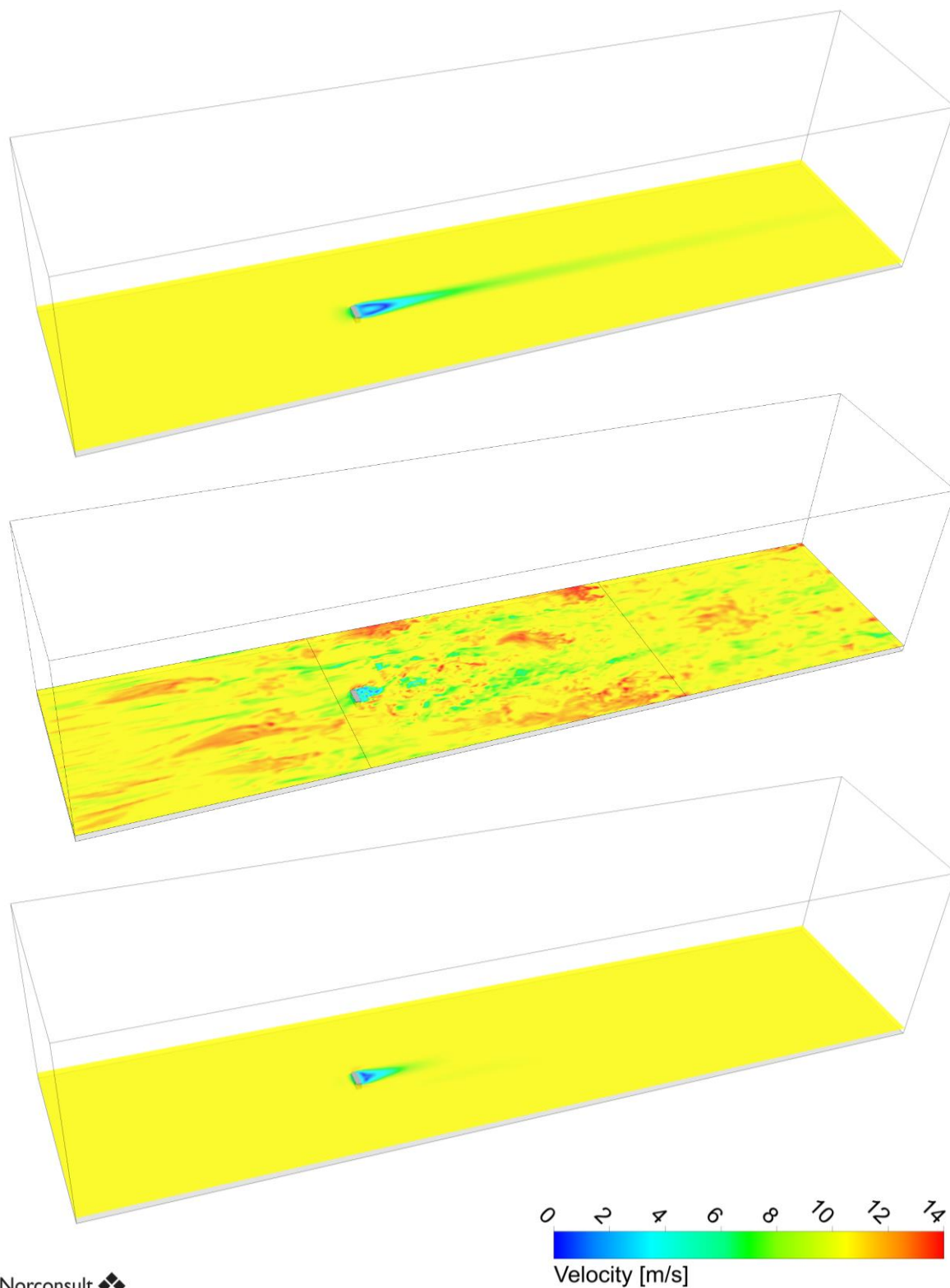
I NASA-rapporten presenteres vindtunnelresultater som forholdstall mellom vindhastighet oppstrøms og nedstrøms bygningen. Figur 6-7 er en originalfigur fra rapporten med resultater fra simuleringene lagt oppå. En ser her at LES (blå linje) treffer målingene svært godt, mens RANS simuleringene (rød og grønn linje) predikerer en altfor lang wake.

Måleteknikken som ble benyttet i målingene, såkalt «hetetrådsanemometri» («Hot-Wire Anemometry»), klarer ikke å måle strømmingen riktig ved svært høye turbulensintensiteter og «ugyldighetsområdet» dette forårsaker er indikert i figuren. Det gjøres oppmerksom på at dette ikke ble kommentert i rapporten, men er relativt klart ut fra dagens kunnskap om slike strømminger og rådgiverens egen erfaring med måleteknikken.

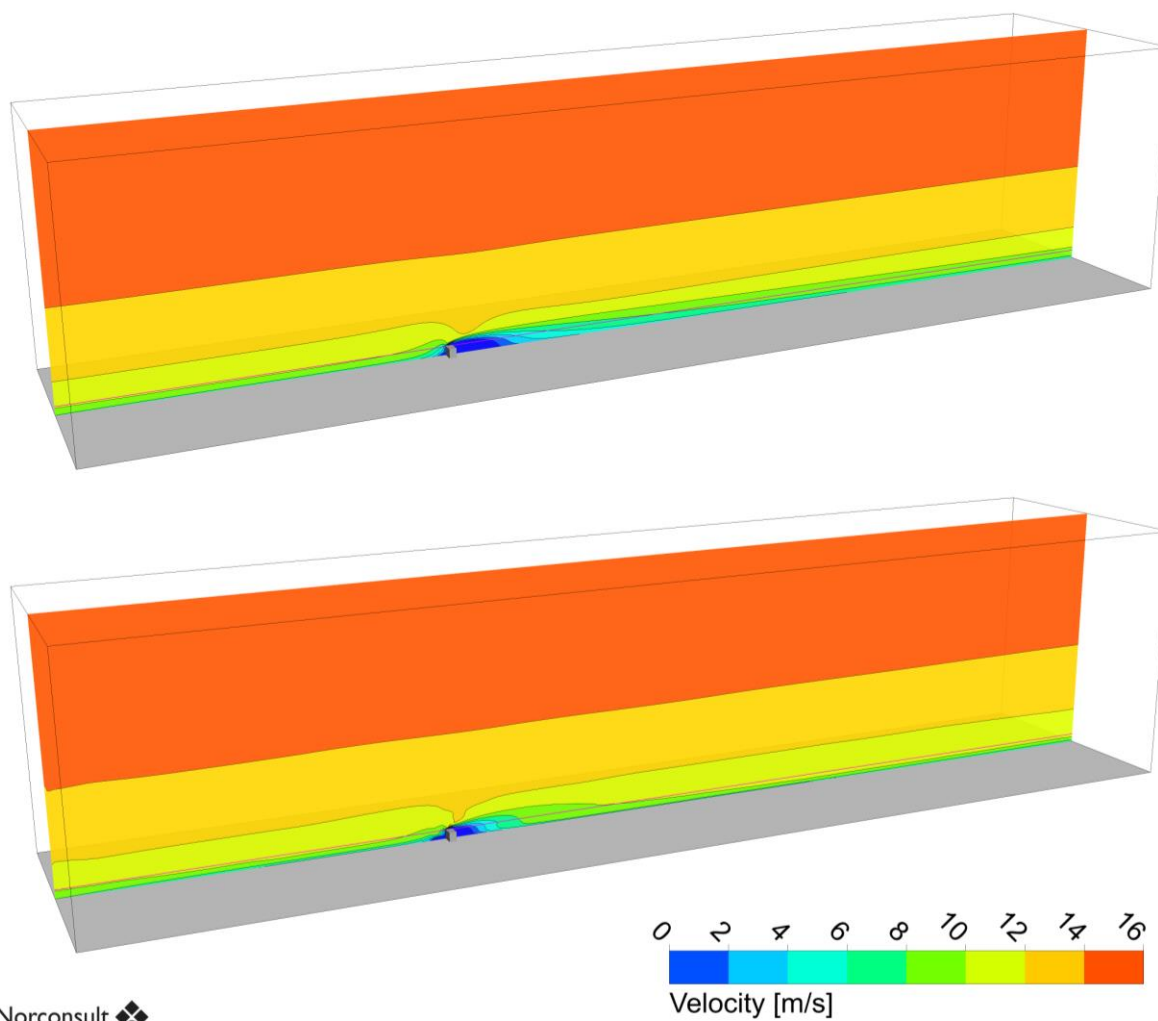
Konklusjonen fra sammenlikningene er at det virker som om LES representerer disse strømmingene på en langt bedre måte enn RANS. Dette var også antagelsen på forhånd.

Det er derfor valgt å benytte LES for simuleringene ved NLBO.

⁴ <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770012772.pdf>

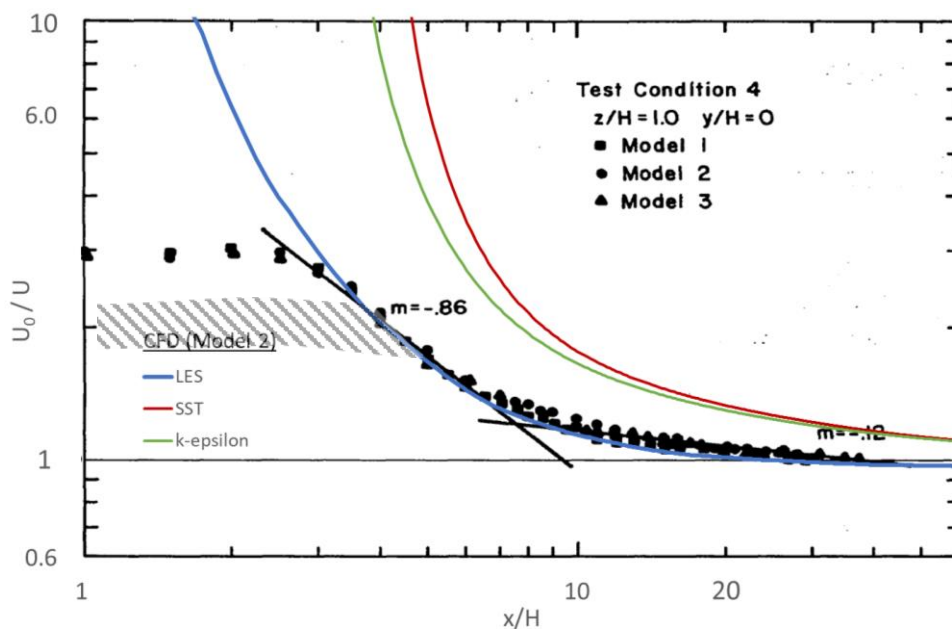


Figur 6-5: Sammenlikning mellom RANS (øverst) og LES (øyeblikksbilde i midten og middelvei nederst)



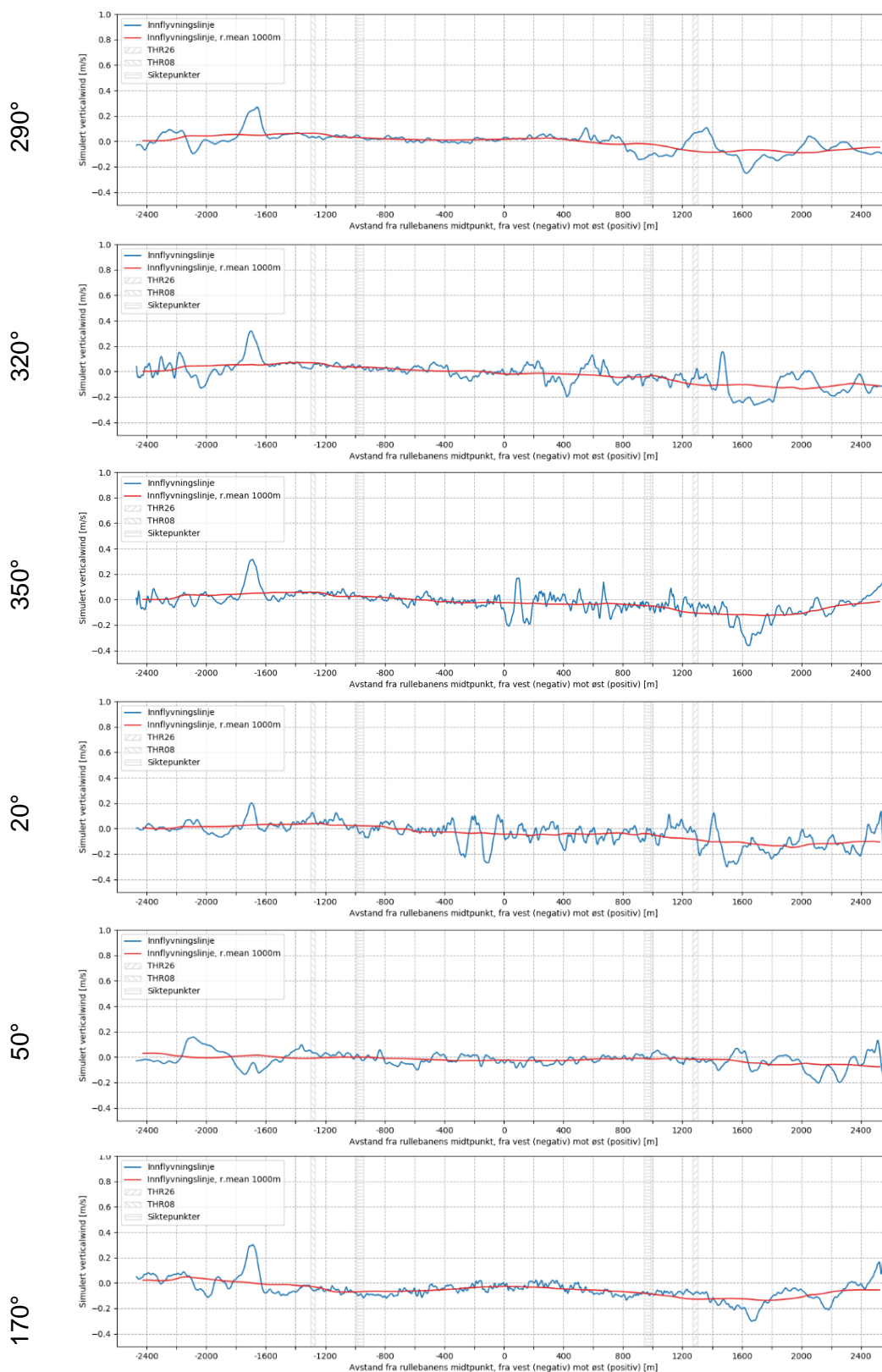
Norconsult

Figur 6-6: Sammenlikning mellom RANS (øverst) og LES (nederst)



Figur 6-7: Forholdstall mellom vindhastighet opp- og nedstrøms for bygningsmodellen. Sammenlikning mellom vindtunnelmålinger (punkter) og CFD-resultater med ulike turbulensmodeller (linjer). Skravert felt viser antatt ugyldighetsområde for målingene.

6.2 Vedlegg B: Linjeplot av vertikalvind



Figur 6-8: Vertikalvind langs innflyging og 10 m over rullebanen, for vindretninger fra 290°, 320° og 350°, 20°, 50° og 170°. Vest mot venstre og øst mot høyre. Rullebanens midtpunkt er angitt ved x=0.