

SINTEF A169 - Åpen

# RAPPORT

## **Vindvariasjoner over Kirkenes lufthavn estimert ved hjelp av numeriske simuleringer**

Karl J. Eidsvik og Torbjørn Utnes

**SINTEF IKT**

Anvendt matematikk

Mai 2006



# SINTEF RAPPORT

## SINTEF IKT

Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøksadresse: Sem Sælands v 5  
7031 Trondheim  
Telefon: 73 59 30 48  
Telefaks: 73 59 43 02

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

TITTEL

**Vindvariasjoner over Kirkenes lufthavn  
estimert ved hjelp av numeriske simuleringer**

FORFATTER(E)

Karl J. Eidsvik og Torbjørn Utnes

OPPDRAGSGIVER(E)

Avinor AS

RAPPORTNR. SINTEF A169	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Erling Bergersen	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN 82-14-02866-3	PROSJEKTNR. 90A260	ANTALL SIDER OG BILAG 19
ELEKTRONISK ARKIVKODE SINTEF A169.pdf	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Karl J. Eidsvik <i>K.J. Eidsvik</i>	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Karstein Sørli <i>K. Sørli</i>	
ARKIVKODE 90A260	DATO 2006-05-23	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Svein Nordenson, Research Director <i>Svein Nordenson</i>	<i>Rune Holdahl</i>

### SAMMENDRAG

Rapporten beskriver estimering av lokale vindeffekter i området rundt Kirkenes lufthavn. Vinder fra sørøstlig, sørlig og nordvestlig kant er simulert. Siden åsene rundt flyplassen er så lave, er bare nøytral stratifisering interessant. Derfor er også beregningene gyldige for alle høydevindsstyrker.

Oppløsningen er valgt så detaljert som kartdataene tillater. Dette kan imidlertid være for grovt til å representere de bratteste åsene. Denne begrensningen er antakelig viktigst ved vind fra sektoren (210-315) grader, der terrenghelningen bak åsen Dammotoaivi antakelig i realiteten er bratt nok til å gi separert strømming. Dette le-området vil være viktig ved avgang fra bane 24.

Bortsett fra dette ventes simuleringene å være realistiske. Det predikeres ikke separert strømming, og det er derfor moderate skjærslag, fallvinder og en maksimal turbulens-intensitet på  $\sqrt{K/U} \approx 0.15$  i området.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Meteorologi	Meteorology
GRUPPE 2	Turbulens	Turbulence
EGENVALGTE	Flysikkerhet	Flight safety

# Vindvariasjoner over Kirkenes lufthavn estimert ved hjelp av numeriske simuleringer

Karl J. Eidsvik, Torbjørn Utnes  
Sintef IKT Anvendt matematikk

23. mai 2006

## Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Simuleringer</b>	<b>3</b>
2.1	Simuleringsområde og terrengrepresentasjon . . . . .	3
2.2	Innløpsbetingelser . . . . .	4
2.3	Vind fra sør-østlig retning (135 grader) . . . . .	4
2.4	Vind fra sørlig retning (180 grader) . . . . .	5
2.5	Vind fra nord-vestlig retning (315 grader) . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>6</b>

# 1 Innledning

Kirkenes flyplass ligger i omtrent 95 m høyde, og de høyeste åsene innenfor ca 5 km radius er Dammoaivi (243 m), Ørretvasshøgda (214 m), Nosfjellet (231 m) og austre Nosfjellet (219 m) (figur 1). Dette betyr høydedifferanser på bare ca 150 m. Store fly følger Nosdalen ved innflygingen til bane 06 og utflygingen fra bane 24, og dette dalføret har en skråstilling på ca 10 grader i forhold til rullebanen. Flyene må derfor svinge 10 grader umiddelbart før landing og etter avgang. Innflygingen foregår langs ca 3.5 grader nær bratte åsrygger, der det kan være systematisk fallvind, vindskjær og betydelig turbulens. Umiddelbart før landing på bane 06, hvor det kan være betydelig sidevind og turbulens, skal det altså svinges ca 10 grader. Med en rullebane på bare omkring 2000 m kan ikke innflygingsfarten velges for stor selv med et tungt fly som har sen motorrespons (ca 5 s, som tilsvarer en responsdistanse  $\ell_f \sim 500$  m. for en Boeing 737). Ved normal stigevinkel (ca 12 grader) vil et fly fort stige over le-områdene selv fra de nærmeste åsene, men på én motor må det følge lavere baner. Både landing på bane 06 og avgang fra bane 24 kan derfor virke noe problematisk, og denne undersøkelsen er fokusert mot å estimere eventuelle vanskelige vindforhold i dette området. Med de flytypene som Widerøe opererer, anses ikke Kirkenes lufthavn som spesielt vanskelig (Johansen 2005).

De enkleste meteorologiske variable som ansees viktigst for flysikkerhet er det som normalt kalles F-faktoren eller “vindskjær”, og det som kalles “turbulens”, representert ved  $\epsilon^{1/3}$ . Disse størrelsene er gitt fra ligningene (1, 2) nedenfor.

$$F = -\frac{c}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{w}{c} = -\frac{c}{g \ell_f} [u(x + \ell_f/2) - u(x - \ell_f/2)t] + \frac{\overline{w}^{\ell_f}}{c} \quad (1)$$

$$\epsilon^{1/3} \approx \left( \frac{(C_\mu^{1/2} K)^{3/2}}{\ell_t} \right)^{1/3} \approx 0.67 K^{1/2} \ell_t^{-1/3} \quad (2)$$

Her bety  $c$  flyfart,  $g$  tyngdens aksellerasjon,  $u$  vindkomponenten langs flybanen,  $w$  vertikal vindkomponent,  $\epsilon$  turbulent dissipasjon,  $K$  turbulent kinetisk energi og  $\ell_t$  turbulent lengdeskala. Midling over lengden  $\ell_f$  er indikert med en linje over uttrykket  $(\dots)^{\ell_f}$ , og koeffisienten  $C_\mu$  er gitt ved  $C_\mu \approx 0.09$ .

Når x-aksen velges positiv langs flyretningen og z-aksen positiv oppover, blir risikabel F-faktor negativ (vanlig praksis kan ofte være motsatt). Turbulensspektret, strukturefunksjonen og variansen av vertikalvinden, er alle grovt sett proporsjonale med  $\epsilon^{2/3}$ . Turbulent lengdeskala bak bratte fjell er sammenlignbar med  $\ell_t \sim \kappa z$ , og de statistiske egenskapene av begge normene vil derfor i stor grad være bestemt av turbulensintensiteten,  $\sqrt{K}$  (Eidsvik og Utnes 2006).

For vanlige rutefly regnes  $F < -0.1$  som risikabel. Når  $\epsilon^{1/3} > 0.5 m^{2/3} s^{-1}$ , regnes turbulensen som så intens at kontrollen over flyet kan mistes. Risikoen for overskridelse av begge disse betingelsene uttrykkes enklere med betingelsen  $\sqrt{K} > 3.5$  m/s. En sterkere turbulensintensitet enn dette ansees da som uakseptabelt. (Eidsvik og Utnes 2006, Utnes og Eidsvik 2006). Nær bakken kan også lavere verdier betraktes som risikable for store fly.

Simuleringene for Kirkenes lufthavn fokuserer på terrengindusert strømning. Siden fjellene nær flyplassen er såpass lave, kan ikke lokalt genererte tyngdebølger være viktige (Baines 1995). De mest interessante terrenginduserte vindeffektene må derfor kunne

avgrenses til sterk strømming med nøytral stratifikasjon. Under slike forhold kan simuleringresultatene skaleres slik at de er gyldige for alle fristrøms hastigheter ( $U$ ).

Med tanke på de mest ugunstige vindretningene både for bane 06 og 24, har vi valgt vind fra **sør-øst (135 grader)** og **nord-vest (315 grader)**. Da kan det være sterk sidevind og turbulens over rullebanen, og det kan være vanskelig å vurdere hvilken av banene som er best. I tillegg blåser da vinden omtrent tvers over de mest fremtredende terrengformasjonene langs og ved siden av innflygningen til bane 06. Vindstatistikk indikerer at den mest dominerende høydevinden for dette området kommer fra sørlige retninger, omkring 150 - 180 grader (Harstveit 2005). I tråd med dette er det også gjort en simulering for vind fra **sørlig retning (180 grader)**.

## 2 Simuleringer

### 2.1 Simuleringsområde og terrengrepresentasjon

Siden oppmerksomheten fokuseres mot relativt småskala terrengvariasjoner, er horisontal gridoppløsning valgt like detaljert som kartdataene,  $\Delta x = 100$  m, med enda noe bedre oppløsning av strømningsfeltet i de sentrale områdene. Med  $150 \times 150 \times 40$  elementer gir dette et integrasjonsområde som illustrert i figur 1.

I tillegg er det gjennomført beregninger med en enda finere gridoppløsning på den sørvestlige delen av dette området, dvs. det området som er mest interessant for innflyging til bane 06 og utflyging fra bane 24. Disse beregningene har en gridoppløsning på  $\Delta x = 50$  m, men representasjonen av terrenget kan likevel ikke bli bedre enn kartdataene. Poenget med den fine oppløsningen er å sikre at modellens gitter er tett nok til å fange opp alle strømvariasjonene som kan representeres med de gitte kartdataene.

Med en horisontal kartoppløsning på  $\Delta x = 100$  m blir ikke helningsvinkler på disse lave åsene vesentlig større enn omkring 20 grader. For at separasjon skal kunne oppstå bak et fjell må fjellets bakside være brattere enn ca  $H/L \approx 0.5$ , som tilsvarer ca 25 grader. Informasjon fra Kirkenes flytårn tyder på at spesielt sør-østsiden av Dammotoaivi og nord-østsiden av austre Nosfjellet er brattere enn dette. Når vinden kommer fra sektoren (210, 315) grader vil derfor simuleringene antakelig undervurdere både vindskjær og turbulens bak Dammotoaivi. Siden åsen er tydelig tre-dimensjonal, vil størrelsen på et eventuelt resirkulasjonsområde ikke strekke seg lengre enn ca  $x \sim 2H \sim 200$  m nedstrøms, men le-effekter må også ventes i betydelig lengre avstand, si over  $x \sim 30H \sim 3\text{Km}$ . Over og i dette le-området kan det være betydelige skjærslag med en maksimal turbulensintensitet helt opp mot  $\sqrt{K}/U \approx 0.25$ . Med en stigevinkel på ca 4.5 grader langs standard utflygingsbane, vil flyet komme inn i dette le-området ganske umiddelbart etter avgang.

Eventuelle separasjonseffekter fra austre Nosfjellet er antakelig viktigst ved sydlige vinder og landing på bane 24, men da er distansen så stor ( $x \sim 30H \sim 3\text{Km}$ ) at slike effekter er vesentlig dempet.

På vesentlig mindre skala enn  $\Delta x = 100$  m må terrenget og overflatens beskaffenhet med vegetasjon og bygninger, representeres som overflateruhet,  $z_0$ . I et storskala terreng med så lave åser og så lave flybaner som ved Kirkenes lufthavn, kan også dette gi vesentlige effekter. Ved et diskontinuerlig sprang i overflateruhet justeres strømmen grovt sett til den nye ruheten under en gitt høyde ca  $0.1x$  nedstrøms fra spranget (Panofsky and Dutton

1984). I 160 m høyde (500 ft) over bakken kan altså terrengjevnheter ca 2 km oppstrøms gi de største strømningsvariasjoner. I mangel av detaljert informasjon om slike terreng- og overflatevariasjoner settes ruheten i simuleringene til  $z_0 = 0.3$  m over land og  $z_0 = 0.001$  m over sjø.

## 2.2 Innløpsbetingelser

I fjellterreng er det vanskelig å vite hvordan realistiske innløpsprofiler ser ut. Derfor må det være rasjonelt å velge enkle og mest mulig standard profiler. Et idealisert innløpsprofil for vind modelleres her som et nøytralt sjiktet likevektsprofil (Panofsky and Dutton 1985, Kaimal and Finnigan 1994), og kan skrives på følgende form for h.h.v. midlere vindhastighet ( $u_0$ ) og turbulent kinetisk energi ( $K_0$ ):

$$u_0(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left( \ln \frac{z}{z_0} + W\left(\frac{z}{D}\right) \right) \quad (3)$$

$$K_0(z) = C_\mu^{-1/2} u_*^2 \left( 1 - \frac{z}{D} \right) \quad (4)$$

Her representerer  $u_*$  friksjonshastigheten, underlagets ruhet er  $z_0$ , høyden over bakken er  $z$  og tykkelsen av grensesjiktet er gitt som  $D \approx 0.2u_*/f = O(1 \text{ km})$ . Den såkalte “wake”-funksjonen er definert v.h.a. formelen  $W(z/D) = (A - 1)(z/D) - A/2(z/D)^2$ , slik at  $W(1)=1$ . Koeffisientene velges som  $\kappa = 0.42$  og  $A = 4.0$ . Høydevinden over grensesjiktet er gitt fra (3), og blir  $U = u_0(D)$ . I simuleringene er følgende verdier valgt: ( $z_0$ ,  $D$ ,  $U$ ) = (0.3 m, 1500 m, 20 m/s), slik at friksjonshastigheten blir  $u_* \approx 0.9$  m/s, og bakkevinden  $u_0(10 \text{ m}) \approx 7.5$  m/s.

## 2.3 Vind fra sør-østlig retning (135 grader)

Figurene 2, 3, 4, 5 illustrerer estimert strømning med vind fra sør-østlig retning. Strømmen går på tvers av Nosdalen, men den predikeres ikke separat noen steder. Heller ikke foran den bratteste delen av Dammotoaivi er det vesentlige reduksjoner av bakkevinden. Vinden langs bakken er nesten horisontalt homogen over hele området (figur 2).

En konsekvens av dette er at forventet vertikalvind nær bakken blir proporsjonal med terrenghelningen,  $w/u \propto H/L$ . Når baksiden av austre Nosfjellet har en typisk helningsvinkel på omkring  $H/L \sim 0.2$  (figur 1), gir da en horisontal strømning på  $U = 20$  m/s, en vertikalvinden som er sammenlignbar med  $w \sim -0.4$  m/s, og figur 4 illustrerer at simuleringene estimerer noe lignende. En slik fallvind er ikke dramatisk stor i seg selv, men som figuren illustrerer, varer den fra ca 3 km og helt inn til landing. Når det i tillegg er en stigevind på omkring  $w \sim 0.4$  m/s ca 3.5 km fra landing, foran den bratteste delen av Dammotoaivi, vil det oppleves som et systematisk vindskjær (ligning 1) fra ca 2.5 km og innover mot landing.

Det er i dette området, fra ca 5 km i 400 m (1200 ft) høyde og inn, at innflygningsbanen kommer ned til den mest intensive turbulensen (figurene 3, 4, 5). Foruten at sterk turbulens kan gi kontroll-problemer (ligning 2), gir den også det stokastiske bidraget til vindskjær (ligning 1) (Eidsvik og Utnes 2006).

Som i klassiske idealiserte strømmer, estimeres økt turbulensintensitet både foran, over og bak åsene (Eidsvik 2005)(figurene 3, 4, 5). Maksimalnivået av turbulensintensitet i innflygingsområdet estimeres til ca  $\sqrt{K} \approx 2.5$  m/s, som tilsvarer  $\sqrt{K}/U \approx 0.13$ .

Nærmere rullebanen enn ca 2 km kommer innflygningsbanen ned i den sterkeste turbulensintensiteten (figur 4). Le-området bak austre Nosfjellet er en hovedårsak til både høy turbulens og fallvind i dette området. Fra denne retningen er det rimelig å anta at helningen av denne åsen ikke er vesentlig underestimert av kartrepresentasjonen (figur 1). Derfor er det også rimelig å anta at turbulensintensiteten bak åsen er relativt bra estimert, og ligger på ca  $\sqrt{K}/U \approx 0.13$ . Hvis vi antar at en kritisk turbulensintensitet for et stort fly så nær landing ligger på omkring  $\sqrt{K} \approx 2.0$  m/s, tilsvarer dette en høydevindbegrensning på ca  $U \approx 15$  m/s.

Umiddelbart etter at flyet rettes ut av den 10 graders svingen, skal det landes på en bane med betydelig sidevind og turbulens. Flyplassen er lokalisert på en ganske to-dimensjonal åsrygg, med høyde  $H \approx 95$  m og halvbredde  $L \approx 1$  km. Når vinden blåser på tvers av en slik åsrygg, vil 'speed-up'-effekt være sammenlignbar med  $(u - u_0)/u_0 \approx 2H/L \approx 0.2$ , og den tilsvarende turbulensøkning er  $(K - K_0)/K_0 \approx 2(u - u_0)/u_0 \approx 0.4$ . Både midlere sidevind og turbulensintensitet vil være vesentlig høyere enn om åsryggen ikke hadde vært der. Høyden av det laget som blir mest påvirket er imidlertid lav:  $(\ell_z/z_0) \ln^2(\ell_z/z_0) \approx 2\kappa^2(L/z_0)$ , si  $\ell_z \approx 10$ m (Eidsvik 2005). Med en fristrøm på  $U \approx 20$  m/s, og bakkevind ca  $u_0(10\text{ m}) \approx 7.5$  m/s, vil altså midlere sidevind i 10 m høyde over rullebanen kunne bli  $u(10\text{ m}) \approx u_0(1 + 2H/L) \approx 9$  m/s. Når turbulensintensiteten er ca  $\sqrt{K} \approx 2.0$  m/s, vil aktuell sidevind med stor sannsynlighet variere innenfor området  $u(10\text{ m}) \pm 3\sqrt{K} \approx (1.5 - 13.5)$  m/s. Bygninger og lokalt bratt terreng med høyder  $H \approx 10$  m vil modifisere dette signifikant over nedstrøms distanser  $x \sim 30H \approx 300$  m.

## 2.4 Vind fra sørlig retning (180 grader)

Figurene 6, 7, 8 illustrerer estimert strømning for denne vindretningen. Fra sørlig retning går vinden mer langs åsene slik at vindskjær og turbulens blir mindre. Et signifikant unntak er nord-østsiden av austre Nosfjellet, som i realiteten antakelig er så bratt at separasjon kan opptre. Dette vil i så fall gi et le-område bakover mot rullebanen med maksimal turbulensintensitet opp mot  $\sqrt{K}/U \approx 0.25$ , betydelig sterkere enn det le-området som er estimert over rullebanen i figur 6. Ved noe mer vestlige vinder vil dette le-området kunne gi vindskjær og turbulens ved landing på bane 24, selv om en slik effekt vil være betydelig svekket pga avstanden  $x \approx 30H$ .

I utflygingsområdet fra bane 24 viser beregningene en systematisk fallvind på ca  $w/u \sim H/L \approx -0.02$  de første 3 km (figur 7). Maksimal turbulensintensitet i utflygingsområdet er ca  $\sqrt{K} \approx 2.0$  m/s, som tilsvarer  $\sqrt{K}/U \approx 0.1$ , altså relativt moderat. Imidlertid, langs en stigevinkel på 4.5 grader, vil turbulensen kunne være betydelig helt opp til ca 400 m (1200 ft) (figur 8).

Estimatene og generelle vurderinger indikerer at det er først når vindretningen i høyden dreier signifikant vestenfor sør at åsen Dammotoaivi kan gi store le-effekter av betydning for lave utflygninger fra bane 24.

## 2.5 Vind fra nord-vestlig retning (315 grader)

Med god informasjon om strømmingen vil antagelig landing på bane 06 og avgang fra bane 24 foretrekkes i dette tilfellet, men variasjoner av bakkevindens retning kan også gi motsatt bane-preferanse.

Figurene 9, 10, 11, 12 illustrerer estimert strømming med vind fra nord-vest. Strømmingen nær bakken viser ingen tegn til separasjon (figur 9), men som tidligere antydnet er sannsynligvis de bratteste le-sidene av Dammotoaivi i realiteten så bratte at separasjon kan oppstå. Bortsett fra dette kan vertikalvinden i nærheten av bakken fortsatt estimeres som  $w/u \sim H/L$ , og figur 11 illustrerer at dette gir rimelige estimater. Fordi terrenget opp fra Korsfjorden og oppover mot Nosdalen stiger, vil det være systematisk stigevind av størrelsesorden  $w/u \sim 0.02$  de første 2.5 km etter avgang fra bane 24. Først etter ca 3 km kommer en lav bane inn i le-området bak Dammotoaivi, der det er fallvind av samme størrelsesorden,  $w/u \sim -0.02$ .

Maksimalnivået på turbulensintensiteten estimeres til  $\sqrt{K} \approx 2.5$  m/s, tilsvarende  $\sqrt{K}/U \approx 0.13$  (figurene 10, 11, 12), og dette er antakelig et rimelig estimat for mesteparten av området, bortsett fra umiddelbart bak Dammotoaivi hvor separasjon kan tenkes. Ved eventuell separasjon kan maksimal turbulens komme helt opp i  $\sqrt{K}/U \approx 0.25$  i separasjonsområdet like bak fjellet (typisk distanse  $2H \sim 300$  m), og dempes deretter gradvis bakover mot  $x \sim 30H \sim 3$  Km. Hvis flyets stigevinkel er vesentlig mindre enn 4.5 grader vil denne høye turbulensen komme umiddelbart etter avgang, samtidig som flyet svinges med vinden.

## 3 Diskusjon

Simuleringene for Kirkenes lufthavn viser vindeffekter som i hovedsak er moderate, uten separasjon eller resirkulasjon. Dette antas å være realistisk i store trekk, men med sannsynlige lokale unntak. I realiteten kan sør-østsiden av Dammotoaivi og nord-østsidan av austre Nosfjellet være brattere enn kartdataene angir, og dermed kan de lokale strømmene her bli separert.

Et eventuelt separasjonsområde fra austre Nosfjellet kan opptre når vinden er sør-sørvestlig, og vil være viktigst for landing på bane 24. Men avstanden fra austre Nosfjellet er imidlertid så stor at le-effektene vil være vesentlig dempet  $x \sim 30H \sim 3$  Km.

Et mulig separasjonsområde fra Dammotoaivi kan opptre når vinden er vestlig til nord-vestlig, og dette vil være viktig ved avgang fra bane 24. Et resirkulasjonsområde i dette området rekker bare ca  $x \sim 2H \sim 200$  m bakover. Over og i et slikt resirkulasjonsområde vil det være kraftige skjærlag med turbulensintensitet helt opp mot  $\sqrt{K}/U \approx 0.25$ . Denne turbulensen avtar gradvis nedstrøms, men betydelige le-effekter strekker seg helt til ca  $x \sim 30H \sim 3$  Km. Dersom flyets stigevinkel bare er ca 4.5 grader langs standard utflygingsbane, vil et fly komme inn i dette le-området ganske umiddelbart etter avgang.

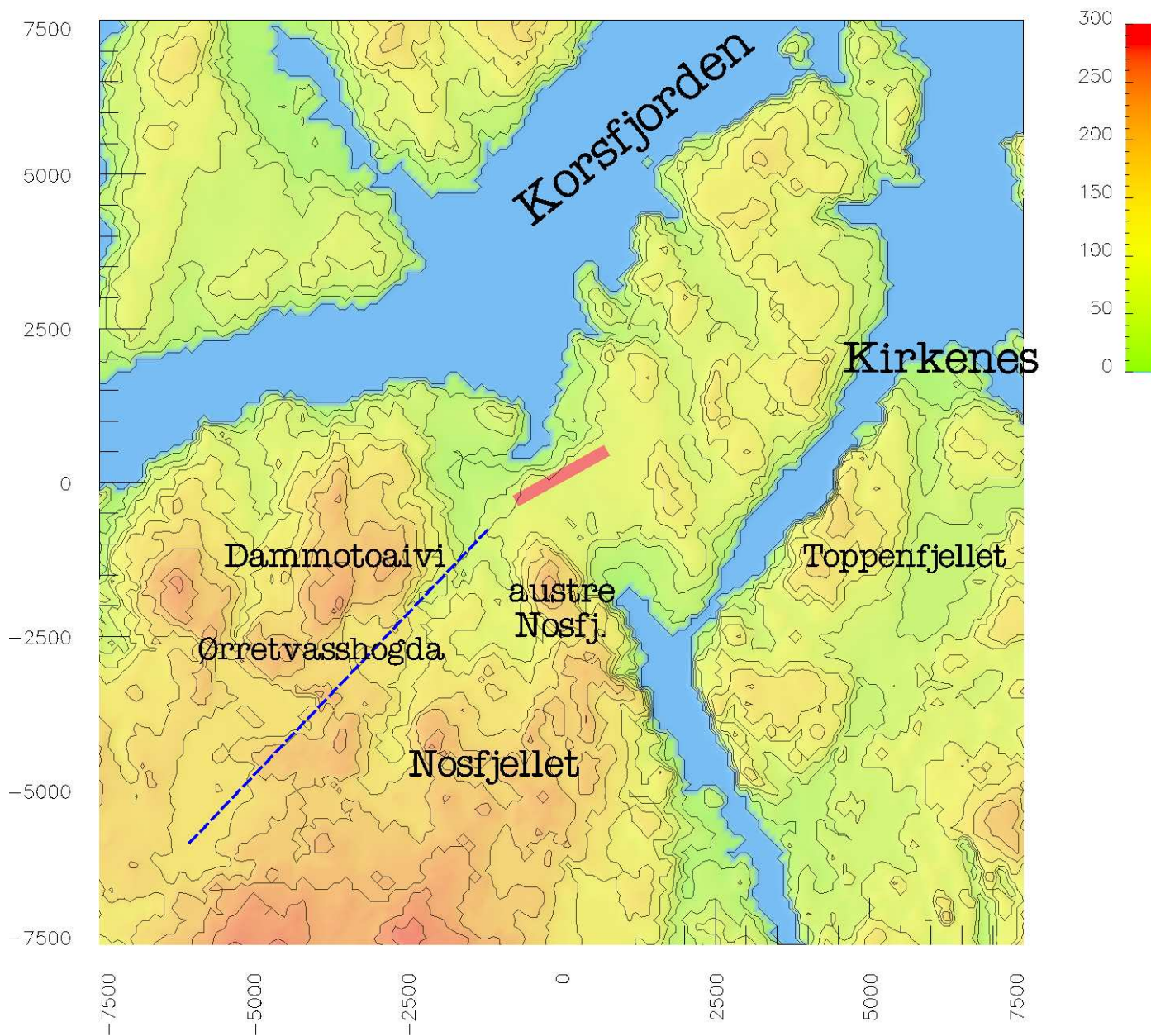
For andre vindretninger ventes ikke separert strømming i området rundt Kirkenes lufthavn, og de simuleringene som er gjort anses da som realistiske. Simuleringene indikerer at forventet vertikalkomponent nær bakken er moderat, og grovt sett kan estimeres fra terrengets helningsvinkel,  $w/u \propto H/L$ . Maksimal turbulensintensitet estimeres grovt som  $\sqrt{K}/U \approx 0.13$ . Denne maksimalverdien opptrer under ca 400 m (1200 ft) når høydevin-



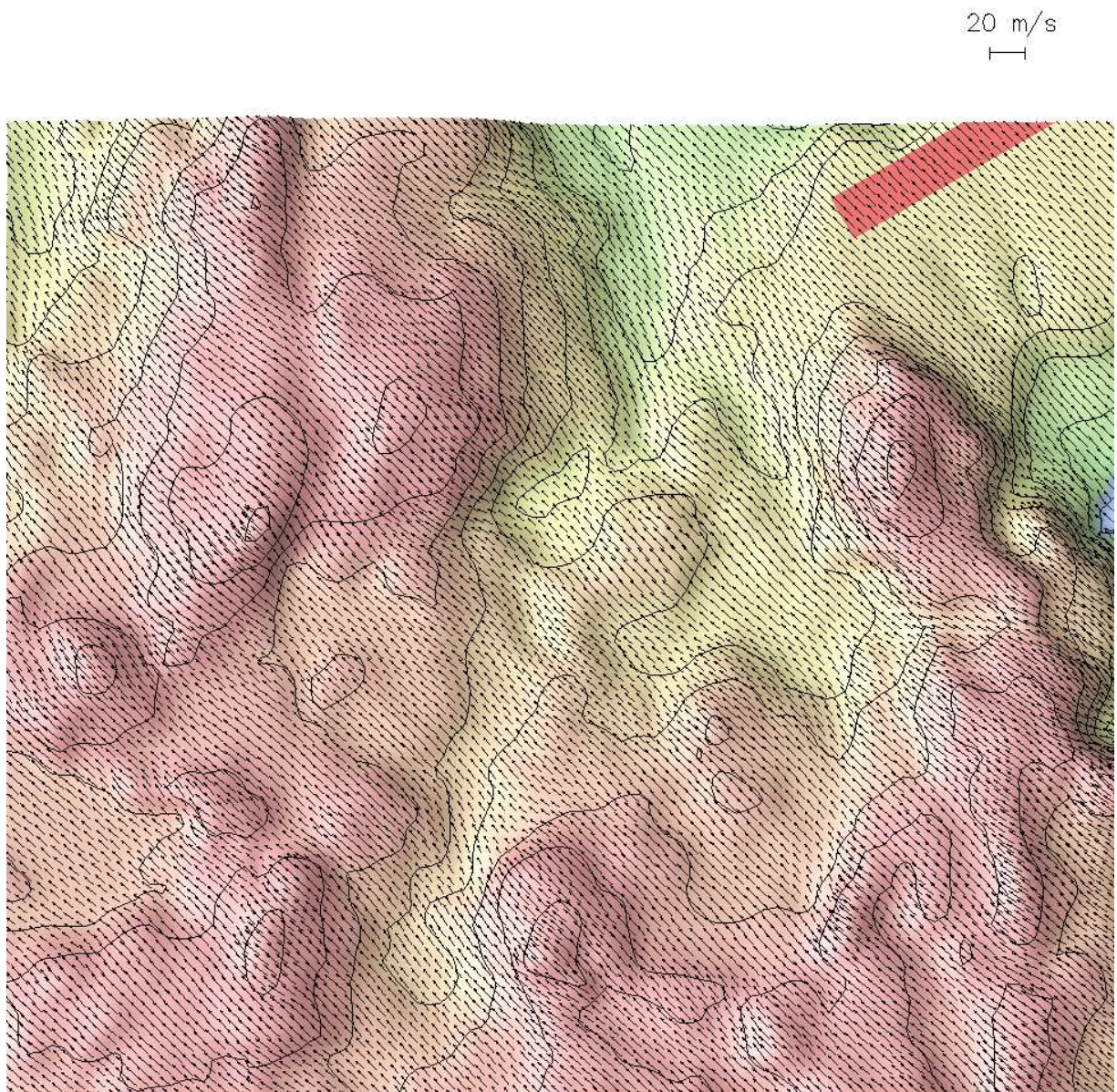
den har en betydelig komponent på tvers av Nosdalen. Dersom en turbulensintensitet på  $\sqrt{K} \approx 2.0$  m/s anses som kritisk i lav høyde, gir dette en høydevinds-begrensning på ca  $U \approx 15$  m/s. Sidevinden over rullebanen kan da grovt sett fluktuere over intervallet (1 – 10) m/s.

## Referanser

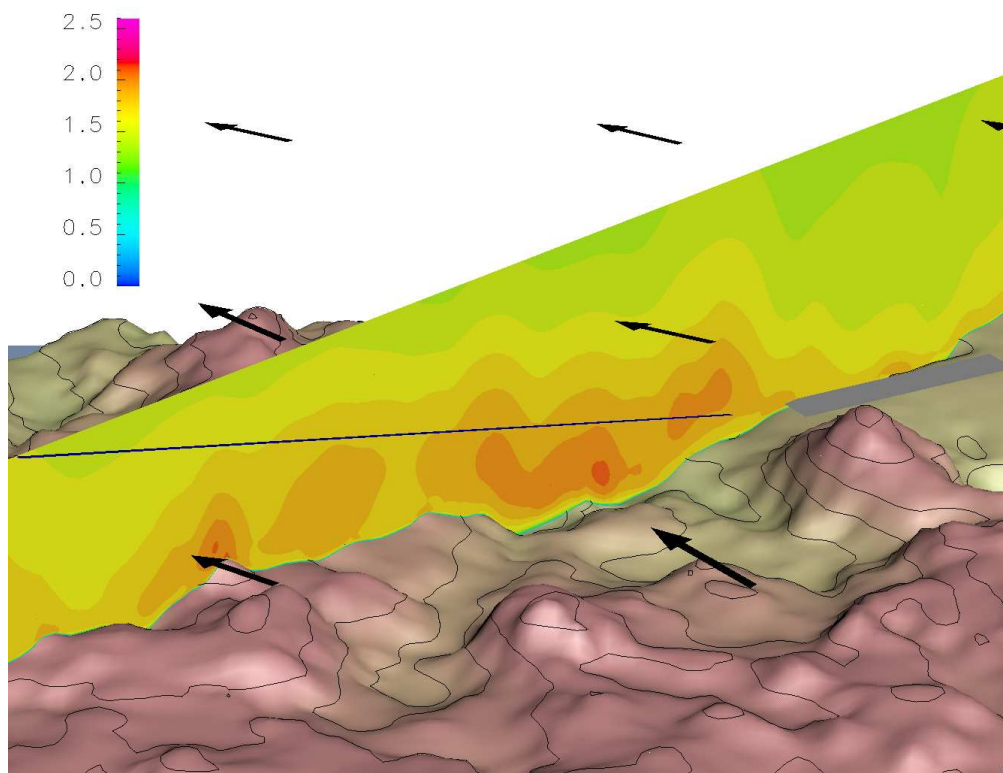
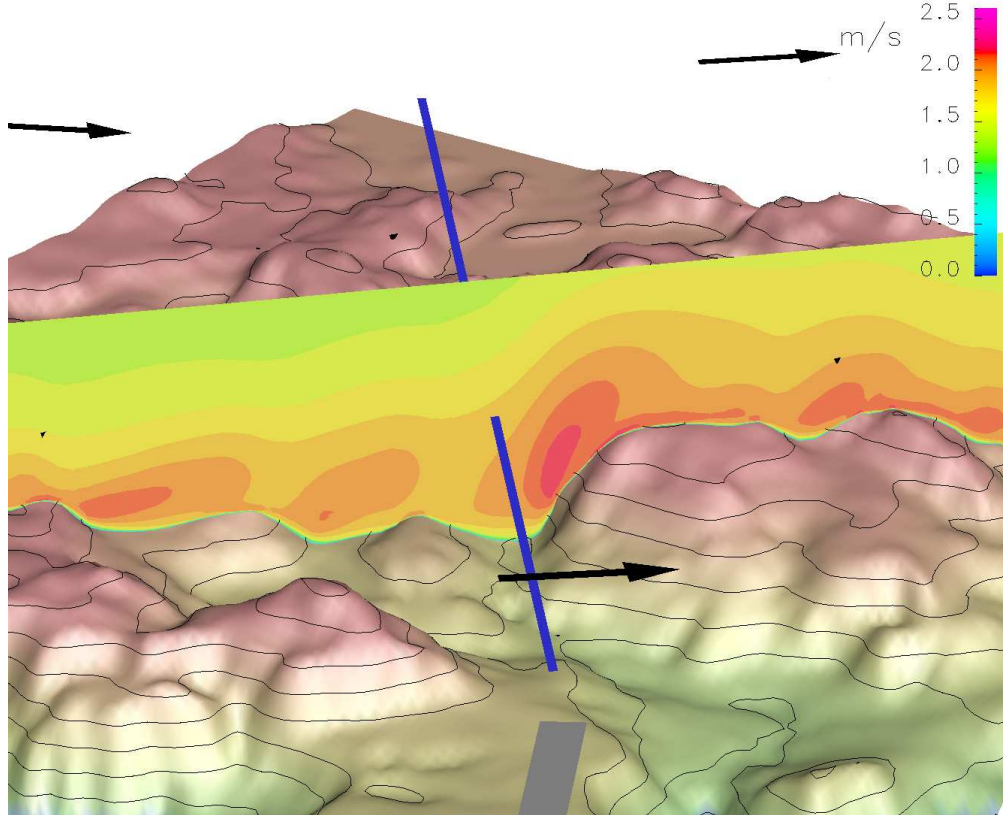
- [1] Baines P.G. (1995): Topographic Effects in Stratified Flows. Cambridge Monographs on Mechanics. 1995 482 pp.
- [2] Eidsvik K.J., Holstad A., Lie I., Utnes T. (2004): A Prediction System for Local Wind Variations in Mountainous Terrain. Boundary Layer Meteorology Vol 112 pp 557–586.
- [3] Eidsvik K.J.(2005): A system for Wind Power Estimation in Mountainous Terrain. Prediction of Askervein Hill Data. Wind Energy Vol 8 pp 337–249.
- [4] Eidsvik K.J. og Utnes T. (2006): Vindvariasjoner over Hammerfest lufthavn basert på estimater for 01-05-05 kl 14:00. SINTEF Anvendt Matematikk
- [5] Johansen B. (2005): Privat kommunikasjon. Widerøe.
- [6] Kaimal J.C., Finnigan J:J (1994): Atmospheric Boundary Layer Flows, Their Structure and Measurement. Oxford University Press 1994.
- [7] Harstveit K. (2005): Privat kommunikasjon. met.no
- [8] Panofsky H.A.and Dutton J.A. (1985): Atmospheric Turbulence. John Wiley, New York. 397pp.
- [9] Utnes T., Eidsvik K.J. (1996): Turbulent flows over mountains modelled by the Reynolds equations. Boundary-Layer Meteorology. Vol 79 pp 393-416.
- [10] Utnes T. og Eidsvik K.J. (2006): Vindvariasjoner over Sørkjosen lufthavn estimert med numeriske simuleringer. SINTEF Anvendt Matematikk



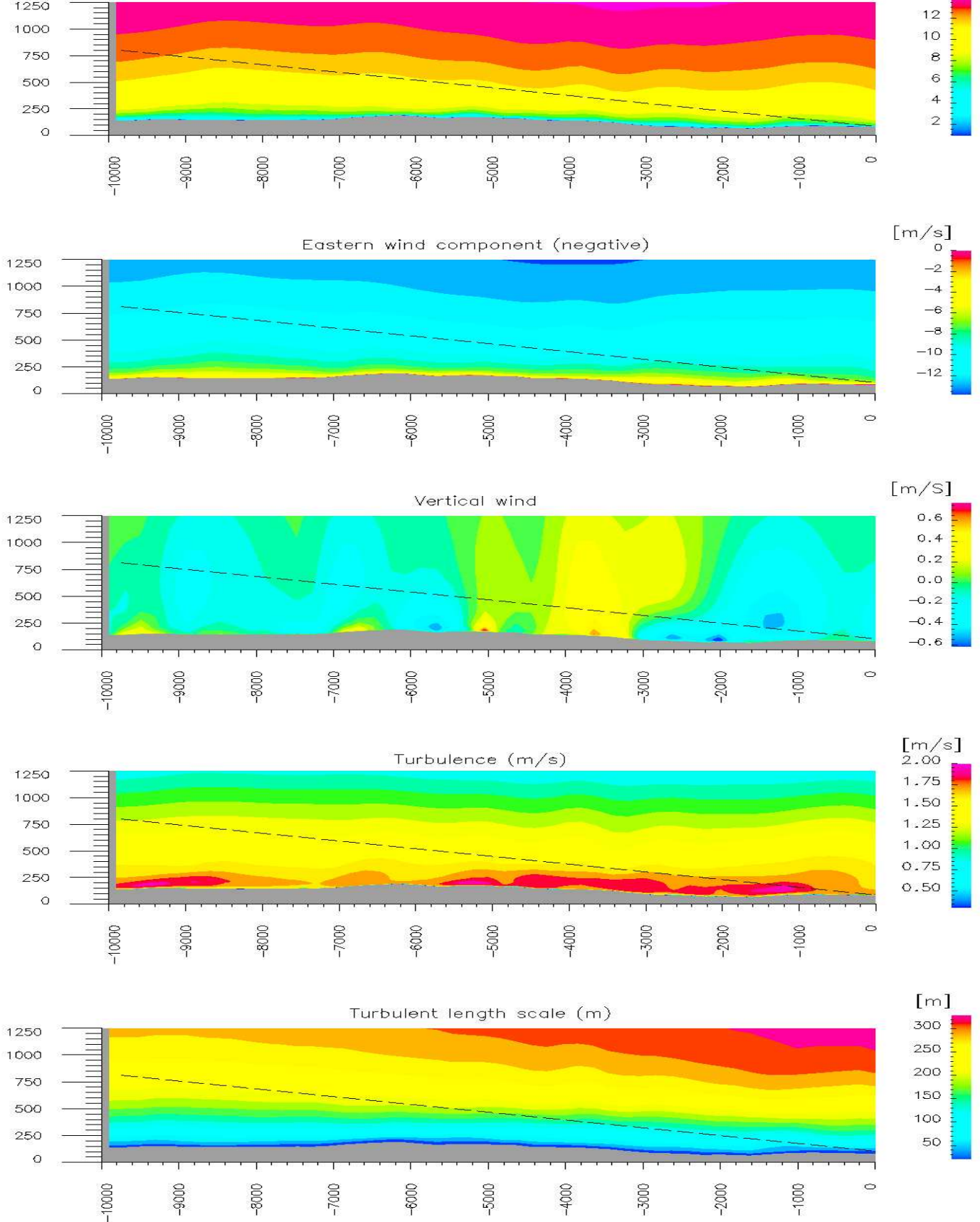
Figur 1: Beregningsområde for simuleringer ved Kirkenes lufthavn. Isohøyder markert for hver 25 m. Rullebanen er markert med rødt, og ligger omkring origo i koordinatsystemet. De nærmeste fjellpartiene er austre Nosfjell med en høyde på ca. 200 m o.h., Dammotoaivri og Ørretvasshogda med omkring 240 m o.h. Blå stiplet linje indikerer rute 046.



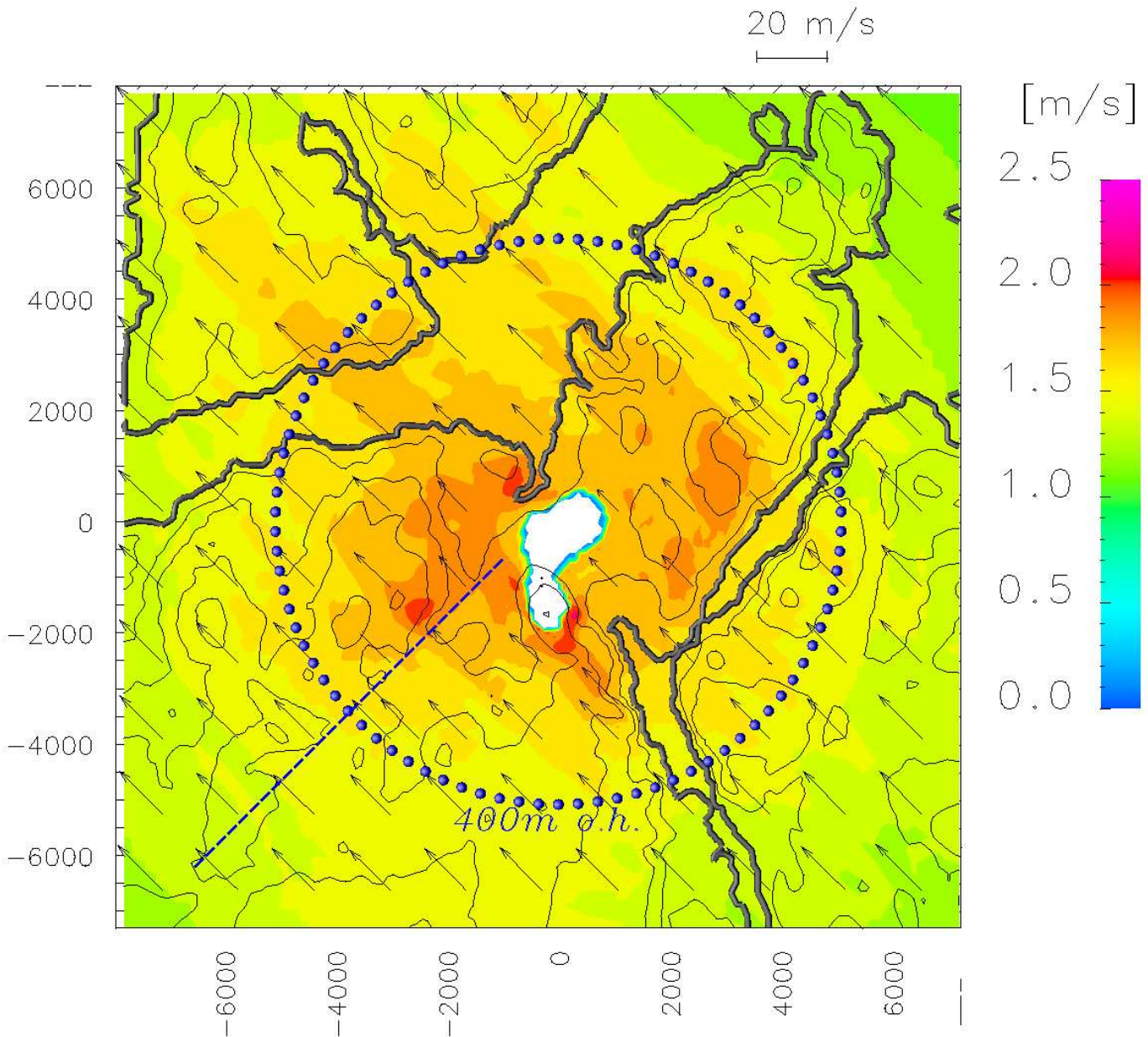
Figur 2: Sørøstlig vind (135 grader): Bakkevind sørvest for rullebanen. Ingen områder med resirkulasjon pga for liten terrengkråning i kartdataene.



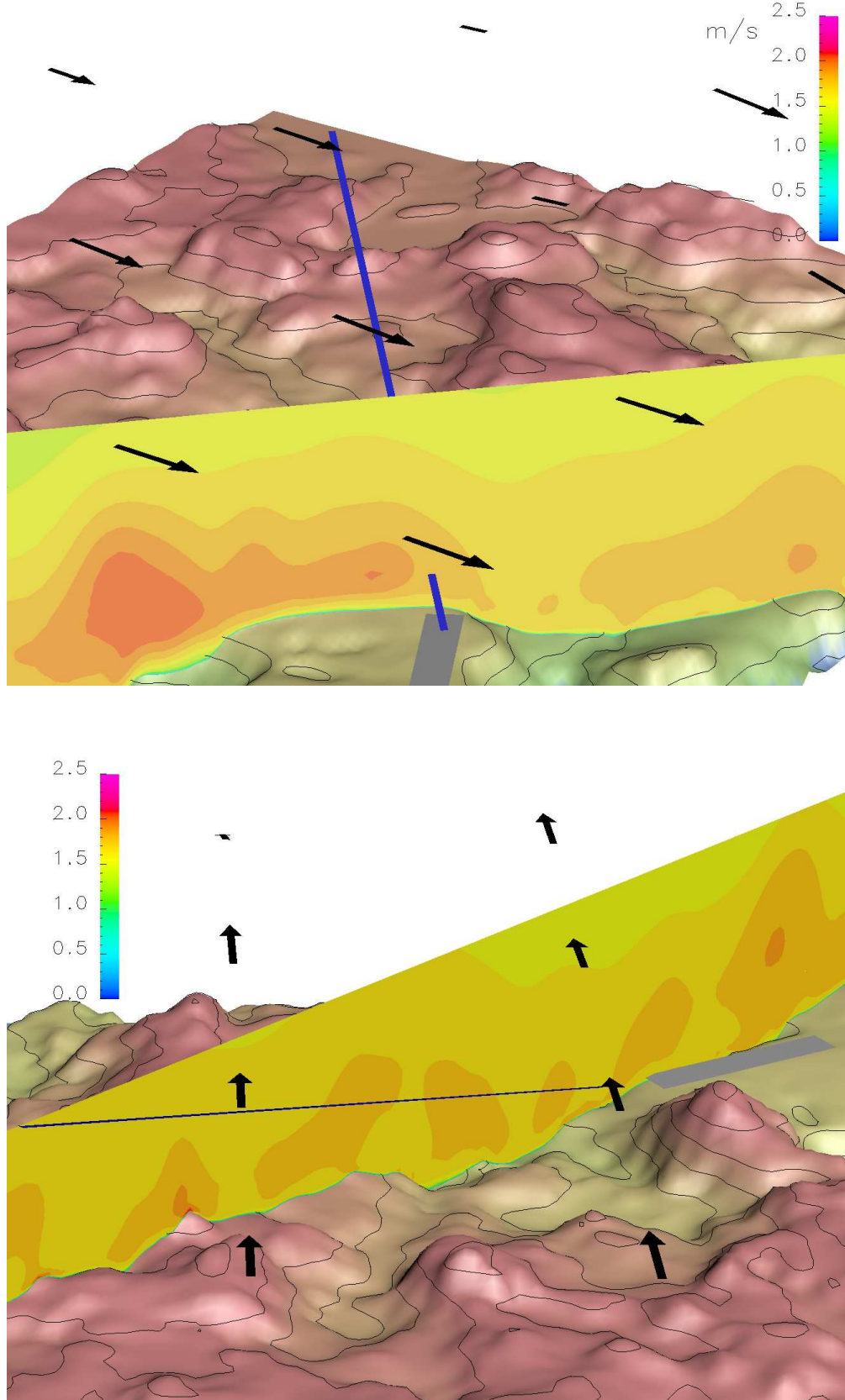
Figur 3: Sørøstlig vind (135 grader): Turbulensintensitet i to snitt sørvest for flyplassen. Øverst: Normalt på innflygingsbanen til rullebane 06 , indikert med blå linje. Nederst: Parallelt med innflygingsbanen til rullebane 06. (4.5 graders vinkel illustrert). Vertikal skala er forstørret 6 ganger sammenlignet med horisontal skala.



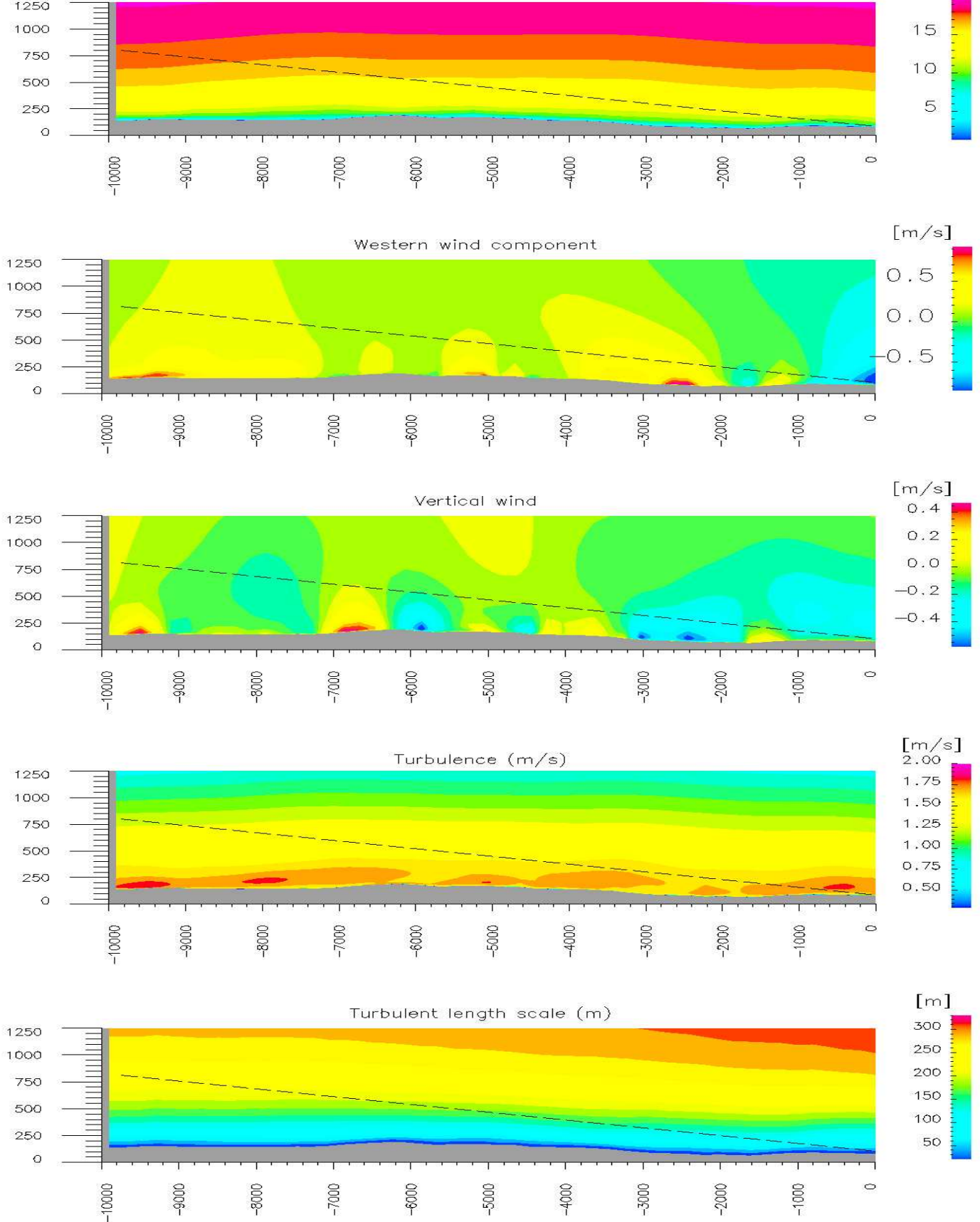
Figur 4: Sørøstlig vind (135 grader): Vertikalsnitt langs bane 046; venstre side av x-aksen ligger sørvest for flyplassen og origo på rulebanen. Figurene viser ovenfra og ned: (a) Sørlig vindkomponent; (b) østlig vindkomponent; (c) vertikalvind; (d) turbulens ( $\sqrt{K}$ ); (e) turbulent lengdeskala.



Figur 5: Sørøstlig vind (135 grader): Predikert turbulens og vindfelt i varierende høyder definert av en kjegleflate med 4.5 graders stigningsvinkel og kjegletopp under sentrum av rullebanen. Markert sirkel for høyde på 400 m o.h.

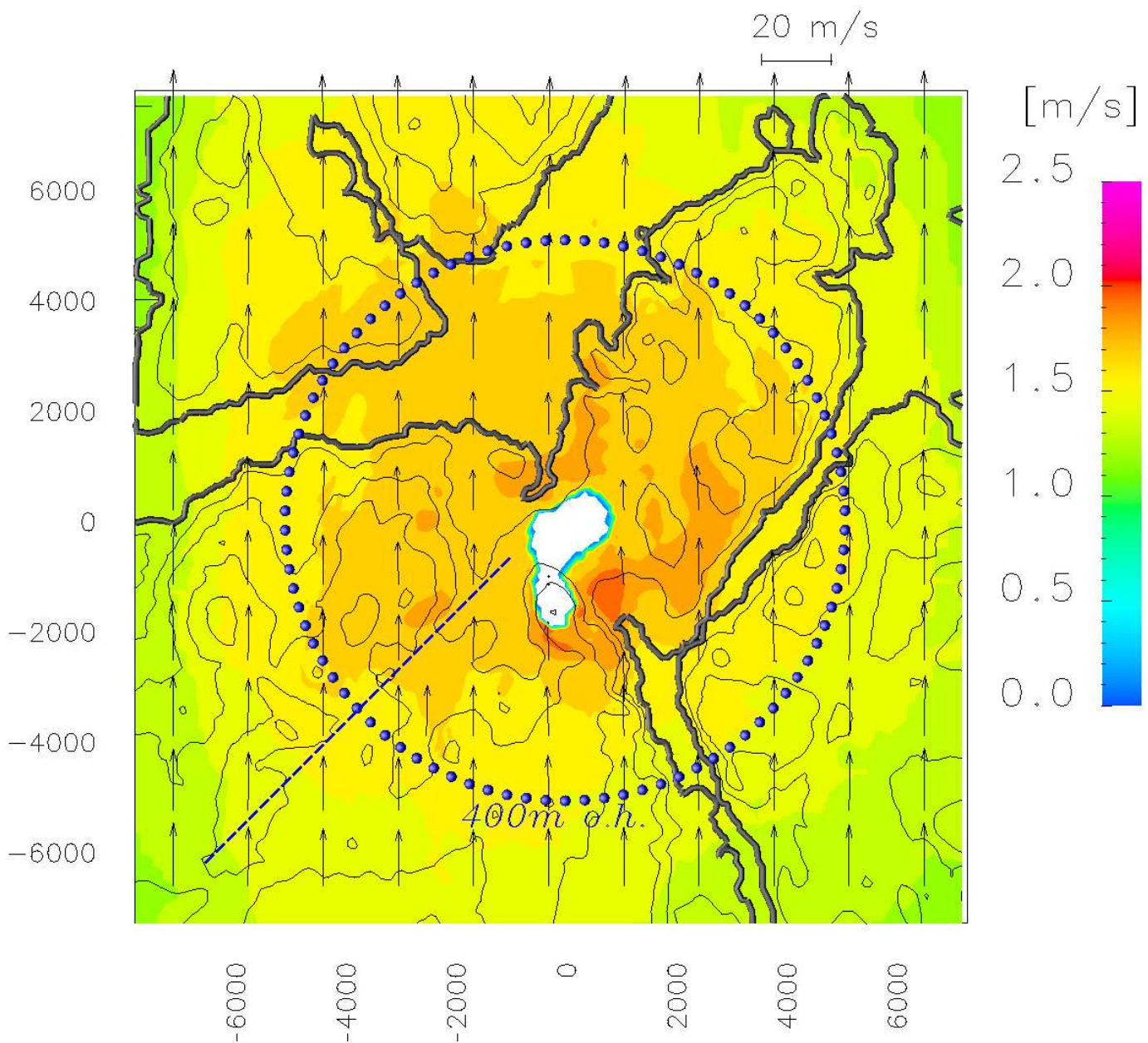


Figur 6: Sørlig vind (180 grader): Turbulensintensitet i to snitt sørvest for flyplassen. Øverst: Vertikalsnitt normalt på utflygingsbanen fra rullebane 240 Nederst; Vertikalsnitt langs utflygingsbanen fra 240 (4.5 graders vinkel illustrert med strek). Vertikal skala er forstørret 6 ganger sammenlignet med horisontal skala.



Figur 7: Sørlig vind (180 grader): Vertikalsnitt langs bane 046; venstre side av x-aksen ligger sørvest for flyplassen og origo på rulebanen. Figurene viser ovenfra og ned: (a) Sørlig vindkomponent; (b) vestlig vindkomponent; (c) vertikalvind; (d) turbulens ( $\sqrt{K}$ ); (e) turbulent lengdeskala.

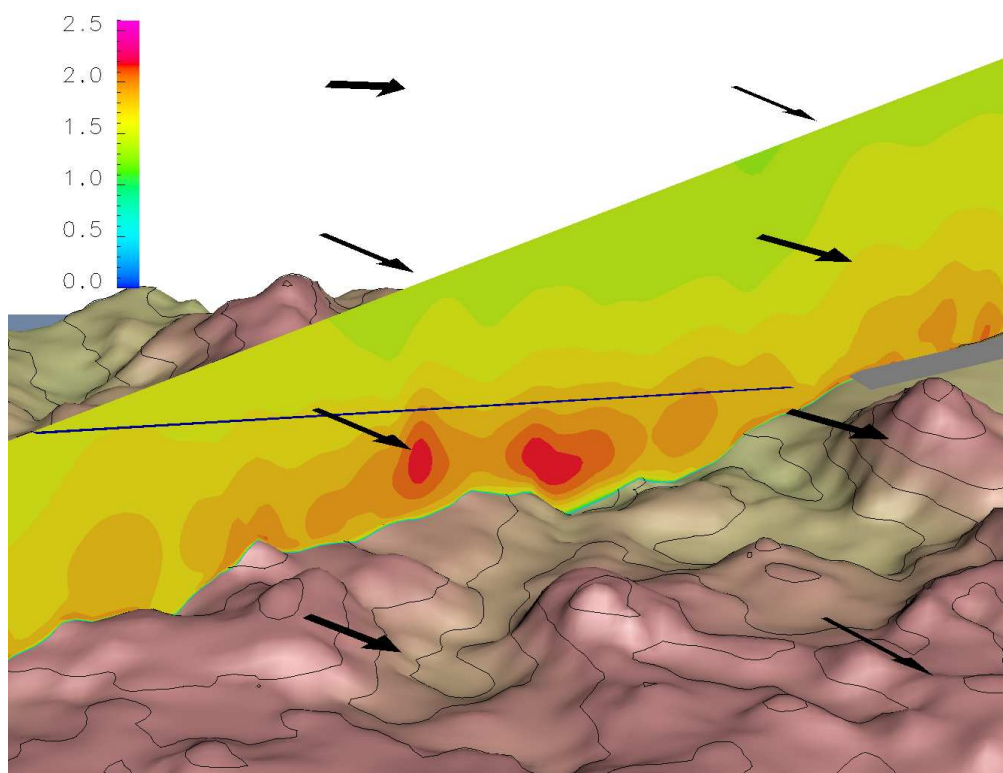
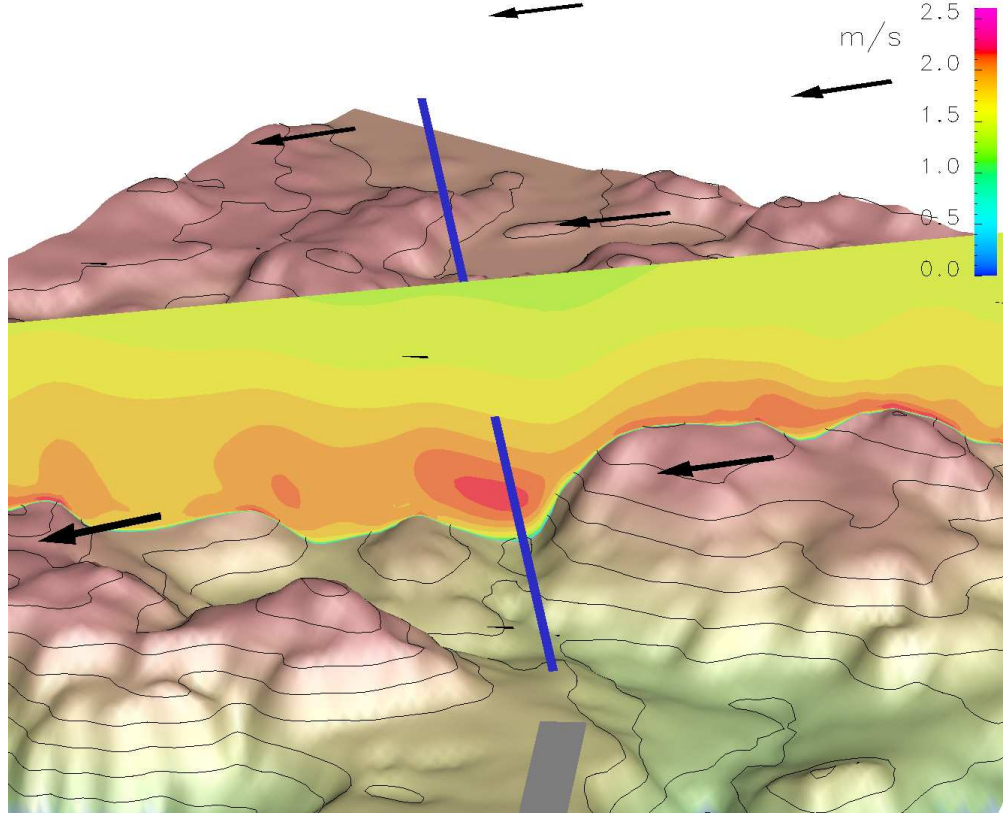




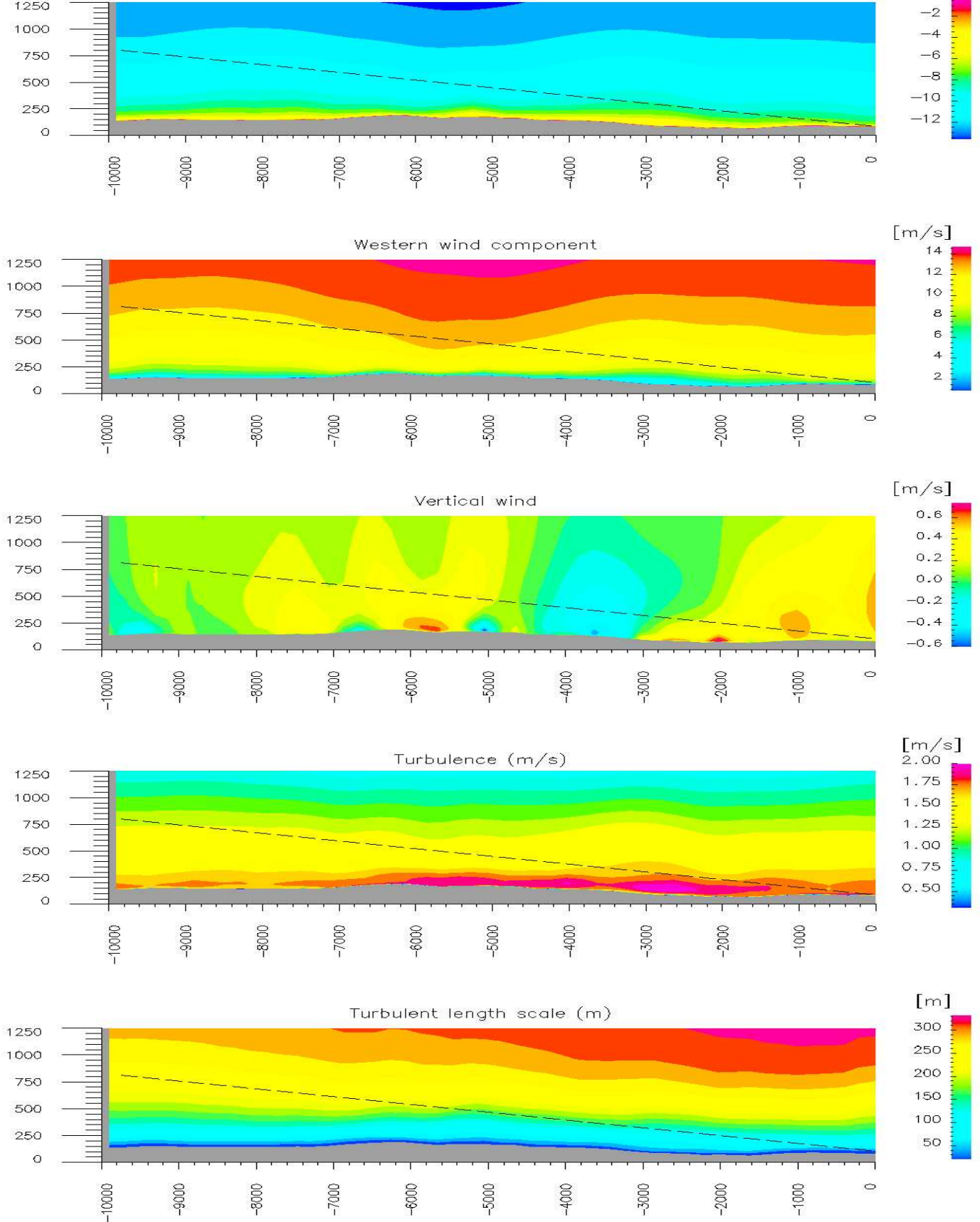
Figur 8: Sørlig vind (180 grader): Prediktert turbulens og vindfelt i varierende høyder definert av en kjegleflate med 4.5 graders stigningsvinkel og kjegletopp under sentrum av rullebanen. Markert sirkel for høyde på 400 m o.h.



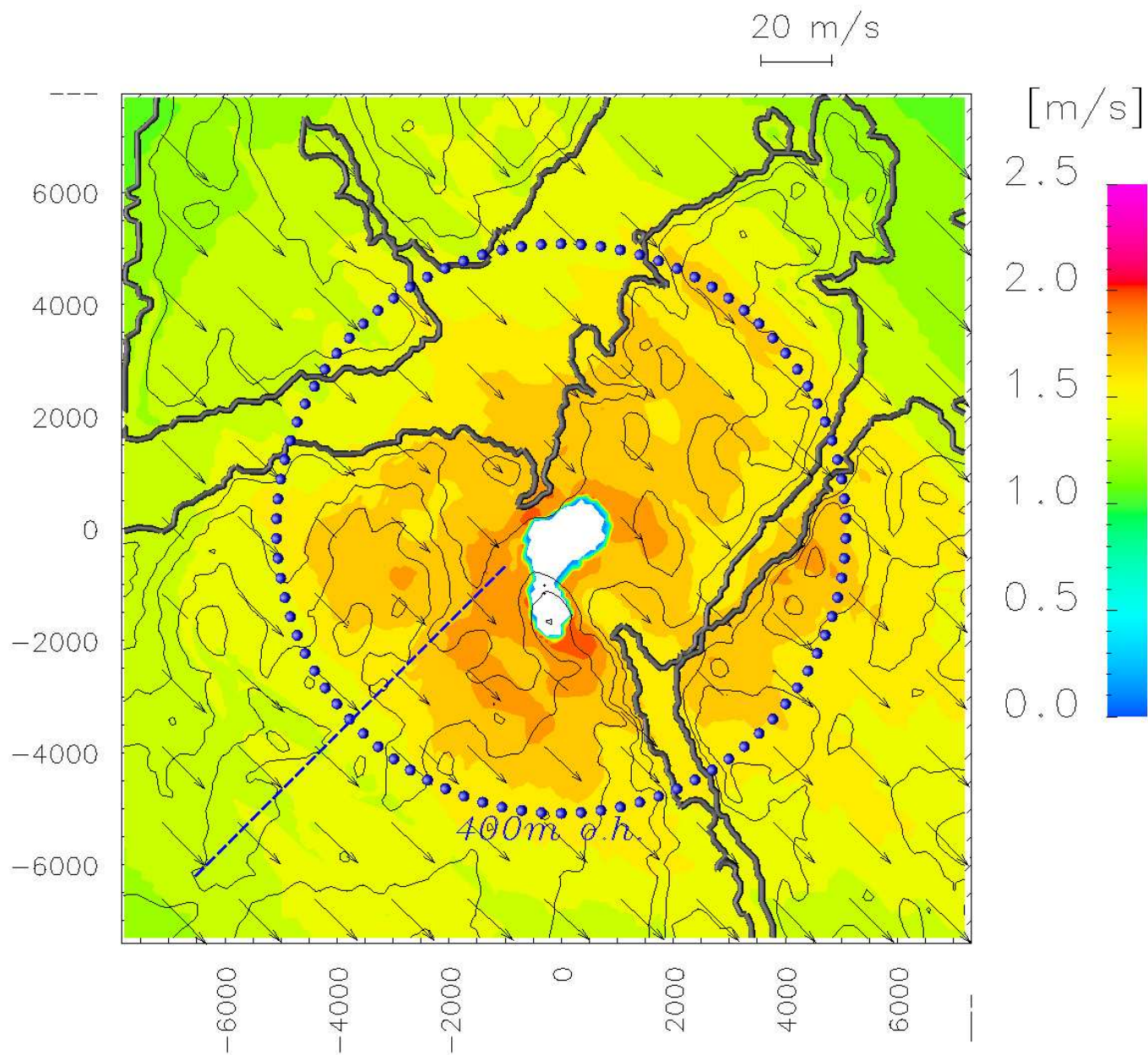
Figur 9: Nordvestlig vind (315 grader): Bakkevind sørvest for rullebanen. Ingen områder med resirkulasjon pga for glatt terrengrepresentasjon.



Figur 10: Nordvestlig vind (315 grader): Turbulens i to snitt sørvest for flyplassen. Blå linje indikerer rute 046 inn mot rullebanen, med en helningsvinkel på 4.5 grader. Øverst er vist et snitt over fjellområdet Dammotoaivi/Ørretvasshøgda, nederst et snitt langs rute 046. Vertikal skala er forstørret 6 ganger sammenlignet med horisontal skala.



Figur 11: *Nordvestlig vind (315 grader)*: Vertikalsnitt langs bane 046; venstre side av x-aksen ligger sørvest for flyplassen og origo på rulebanen. Figurene viser ovenfra og ned: (a) Nordlig vindkomponent; (b) vestlig vindkomponent; (c) vertikalvind; (d) turbulens ( $\sqrt{K}$ ); (e) turbulent lengdeskala.



Figur 12: Nordvestlig vind (315 grader): Prediktert turbulens og vindfelt i varierende høyder definert av en kjegleflate med 4.5 graders stigningsvinkel og kjegletopp under sentrum av rullebanen. Markert sirkel for høyde på 400 m o.h.