

SINTEF A161 - Åpen

# RAPPORT

## **Vindvariasjoner over Hammerfest lufthavn basert på estimer for 01-05-2005 kl 14:00**

Karl J. Eidsvik og Torbjørn Utnes

**SINTEF IKT**

Anvendt matematikk

Mai 2006



# SINTEF RAPPORT

## SINTEF IKT

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

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

TITTEL

## Vindvariasjoner over Hammerfest lufthavn basert på estimater for 01-05-2005 kl 14:00

FORFATTER(E)

Karl J. Eidsvik og Torbjørn Utnes

OPPDRAGSGIVER(E)

Avinor AS

RAPPORTNR. SINTEF A161	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Erling Bergersen	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN 82-14-02862-0	PROSJEKTNR. 90A260	ANTALL SIDER OG BILAG 26
ELEKTRONISK ARKIVKODE SINTEF A161.pdf	PROSJEKTLÉDER (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>S. Nordenson</i>	

### SAMMENDRAG

Rapporten beskriver estimering av lokale strømmer i området rundt Hammerfest lufthavn. I nært nøytrale strømmer over bratte fjell som dette vil strømmen bli separert slik at maksimal turbulensintensitet bak fjellene vil bli opp mot  $\sqrt{K/U} \approx 0.25$ . Når øvre grense for forsvarlig flyging regnes som ca  $\sqrt{K} \approx 3.5$  m/s, tilsvarer altså dette flybegrensninger allerede ved en høydevindstyrke som er større enn omkring  $U > 15$  m/s for de mest ugunstige vindretningene.

Stratifisert strømning kan også gi problematiske flyforhold og de simuleringene som er gjort i denne studien er valgt omtrent som aktuell strømning den 01-05-2005 kl 14:00, da et Widerøe-fly ble skadet ved en hard landing. Strømmen er sydøstlig med tydelig stratifikasjon. Betydelige tyngdebølger med rotoreffekter estimeres og maksimal turbulensintensitet er større enn  $\sqrt{K} > 3.5$  m/s.

Stratifiserte strømmer som dette kan gi vesentlig større bølgeamplituder (med brytning), rotoreffekter, eller hydrauliske sprang, som kan gi vesentlig større vindskjær, fallvind og turbulensintensitet enn det som er simulert. Slike forhold kan opptre mange steder i Norge når strømmen kommer fra høye fjell.

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

# Vindvariasjoner over Hammerfest lufthavn basert på estimerer for 01-05-2005 kl 14:00

Karl J. Eidsvik og Torbjørn Utnes  
SINTEF IKT Anvendt matematikk

23. mai 2006

## Innhold

<b>1 Innledning</b>	<b>3</b>
<b>2 Simuleringer</b>	<b>4</b>
2.1 Regionalt og lokalt modellområde . . . . .	4
2.2 Værsituasjonen 1-5-2005 kl 14:00; vind fra ca 170 grader . . . . .	4
2.3 Vind fra ca 140 grader . . . . .	6
2.4 Vind fra ca 200 grader . . . . .	6
<b>3 Diskusjon</b>	<b>7</b>
3.1 Informasjon fra lokale målinger . . . . .	7
<b>4 Referanser</b>	<b>8</b>

## Sammendrag

Rapporten beskriver estimering av lokale strømmer i området rundt Hammerfest lufthavn. I nært nøytrale strømmer over bratte fjell som dette vil strømmen bli separert slik at maksimal turbulensintensitet bak fjellene vil bli opp mot  $\sqrt{K}/U \approx 0.25$ . Når øvre grense for forsvarlig flyging regnes som ca  $\sqrt{K} \approx 3.5$  m/s, tilsvarer altså dette flybegrensninger allerede ved en høydevindstyrke som er større enn omkring  $U > 15$  m/s for de mest ugunstige vindretningene.

Stratifisert strømning kan også gi problematiske flyforhold og de simuleringene som er gjort i denne studien er valgt omtrent som aktuell strømning den 01-05-2005 kl 14:00, da et Widerøe-fly ble skadet ved en hard landing. Strømmen er sydøstlig med tydelig stratifikasjon. Betydelige tyngdebølger med rotoreffekter estimeres og maksimal turbulensintensitet er større enn  $\sqrt{K} > 3.5$  m/s.

Stratifiserte strømmer som dette kan gi vesentlig større bølgeamplituder (med brytning), rotoreffekter, eller hydrauliske sprang, som kan gi vesentlig større vindskjær, fallvind og turbulensintensitet enn det som er simulert. Slike forhold kan opptre mange steder i Norge når strømmen kommer fra høye fjell.

# 1 Innledning

Erfaring tilsier at flyging på Hammerfest lufthavn kan være assosiert med mye turbulens og vindskjær. Dette er rimelig på grunn av rullebanens plassering, rett under den bratte sydøstlige fjellveggen av fjellpartiet Storfjellet-Miilet. Alle fristrømmer med signifikant komponent på tvers av denne fjellveggen vil kunne gi resirkulasjonsområder med intens turbulens og vindskjær over flyplassen. Dette gjelder i første rekke ved nordvestlig vind. Når vinden er nært nøytralt sjiktet, viser erfaring at maksimal midlere turbulensintensitet i et resirkulasjonsområdet bak fjell vil være av størrelsesorden  $\sqrt{K}/U \approx 0.25$ . Her betyr  $U$  den karakteristiske midlere vindstyrken over fjellet (i ca 1000 m høyde), og  $K$  betyr midlere turbulent kinetisk energi. Både generell eksperimentell erfaring, teori og numeriske simuleringer med detaljerte grid viser dette (Kaimal and Finnigan 1994, Baines 1995, Utnes and Eidsvik 1996, Eidsvik and Utnes 1997). Grovt sett er 'sterk' turbulens karakterisert ved  $\sqrt{K} > 3.5$  m/s (Eidsvik 2006). Dette inntreffer altså når middelvinden over fjellene (i ca 1000m høyde) er større enn ca  $U \approx 15$  m/s. I mangel av etablerte alternativer, kaller vi både  $\sqrt{K}$  og  $\sqrt{K}/U$  for turbulensintensitet.

Vind fra sørøstlig retning kan også gi resirkulasjon over flyplassen Men et slikt resirkulasjonsområde foran et fjell (Storfjellet-Miilet) er normalt relativt lite og svakt, og ansees vanligvis som mindre problematisk enn det tilsvarende resirkulasjonsområdet bak fjellet. **Stratifisert** strømning over oppstrøms fjell kan imidlertid bidra til å gi vesentlig større turbulens for slike vindretninger. Stratifikasjonen avgjør om en luftpakke som blir løftet av for eksempel et fjell, blir tyngre eller lettere enn de omgivelsene som den kommer til. Er den lettere, vil den fortsette å stige og konvek-tive skyer kan bli utviklet. Er den tyngre, vil den falle tilbake og tyngdebølger kan bli utviklet. Dette bestemmes av den vertikale fordelingen av potensiell temperatur. Når  $\partial\theta/\partial z < 0$ , er stratifikasjonen (sjiktningen) negativ med termisk ustabilitet. Når  $\partial\theta/\partial z > 0$ , er stratifikasjonen positiv med termisk stabilitet. I denne studien fokuseres positiv stratifikasjon med dannelse av **fjellbølger** som kan gi sterk turbulens. Fjellformasjonene Storfjellet-Miilet og Svartfjellet har en nordøstlig struktur, slik at når høydevinden kommer fra sørøstlig retning, vil de gi to-dimensjonale effekter og lett danne tyngdebølger (Baines 1995, Vosper 2004, Sheridan and Vosper 2005). Under slike forhold ble et Widerøe-fly skadet under et landingsforsøk på bane 05, den 01-05-2005 kl. 14:00 norsk tid.

Denne rapporten beskriver bl.a. beregninger av strømmingen ved dette tidspunktet. Simuleringene er gjennomført ved bruk av det lokale varslingsystemet som er utviklet av SINTEF og Meteorologisk Institutt (Utnes 2002, Lie et al 2003, Eidsvik et al 2004, Eidsvik 2005). Ingen justeringer er gjort, verken av modeller eller data, slik at estimatene kunne ha vært varsler for 01-05-2005 kl. 14:00. Beregningene på den minste skalaen blir spesielt diskutert. Både en og to nedskaleringer er gjennomført med utgangspunkt i varslingsdata fra UM1- modellen (som har en oppløsning på 1 km). Første nedskalering dekker et område som omfatter hele Kvaløya (kalt regional skala), og den fineste nedskaleringen dekker et område på (5 x 5) km rundt flyplassen ved Hammerfest (lokal skala).

For å studere effekter av storskala vindvariasjoner, er referanseretningen i tillegg rotert 30 grader mot solen (mer østlig vindretning), og 30 grader med solen (mer sørlig vindretning). Disse forandringene er gjennomført ved å dreie vindfeltet fra UM1-simuleringen, med uendret initialfelt for temperatur og turbulens.

De daglige varslene for Hammerfest blir gjort på det største av disse nedskalerte

områdene. Denne studien viser at estimatene på denne skalaen er rimelig nøyaktige selv ganske nært rullebanen. Detaljer kan imidlertid bli forskjellige og turbulensintensiteten kan være underestimert med en faktor på 1.5 sammenlignet med beregningene på den fineste skalaen.

Når varslingssystemet for Hammerfest har fungert en tid, vil man få grunnlag for å estimere i større detalj hvilke vær-situasjoner som vanligvis gir den største turbulensintensiteten. Derved kan både denne systematiserte erfaringen og aktuelle varsler brukes til varsling.

## 2 Simuleringer

### 2.1 Regionalt og lokalt modellområde

Bakgrunnen for de numeriske modellene, med annen relevant teoretisk bakgrunnsinformasjon er beskrevet av Utnes 2002, Lie et al 2003, Eidsvik et al 2004 og Eidsvik 2006.

I det følgende diskuterer vi simuleringresultatene, med hovedvekt på de minste skalaene, her betegnet som regional og lokal skala. Figur 1 viser kartutsnitt over det regionale simuleringområdet som er brukt for simuleringene med modellen SIMRA, og som dekker hele Kvaløya og deler av havområdet utenfor. Hovedgrunnen til å ta med hele dette området er for å fange opp eventuelle fjellbølger. I slike tilfeller er det viktig å få med de høyeste fjellene oppstrøms. Dette regionale området har en størrelse på 28 km, 32 km i hhv. østlig og nordlig retning, og beregningsområdet har en høyde på 4 km.

Innenfor dette regionale området er det nestet inn et lite område på  $(5 \times 5)$  km for å se på helt lokale forhold rundt flyplassen. Figur 2 illustrerer de to områdene, hvor det minste området er markert med farger. Beregningene for det største området er gjort på et grid med størrelse  $151 \times 151 \times 46 = 1\,048\,846$  noder, som gir en oppløsning i de sentrale områdene på  $\Delta x \approx (150 - 200)$  m. Det minste området har en gridstørrelse på  $101 \times 101 \times 41 = 418\,241$  noder, som gir en oppløsning på  $\Delta x \approx (30 - 40)$  m.

Beregningene på den minste skalaen sier også noe om hvor representative de mer storskala lokale estimatene er, dvs. det som her betegnes 'regional' skala ( $\Delta x \approx 200$  m). Når varslingssystemet skal brukes daglig, er en oppløsning på  $\Delta x \approx (30 - 40)$  m foreløpig for kostbar.

### 2.2 Vær-situasjonen 1-5-2005 kl 14:00; vind fra ca 170 grader

Vær-situasjonen 01-05-2005 kl 14:00 er simulert med varslingssystemet, uten modelljusteringer, slik at simuleringene i prinsipp kunne vært varsler. Strømmen over fjellene er karakterisert av en midlere høydevind (1000 m) på  $U \approx 15.5$  m/s, med hovedretning fra ca 170 grader (sør-sørøstlig retning). Grensesjiktet er nært nøytralt stratifisert opp til en inversjon i ca  $D \approx 1500$  m høyde. Over inversjonen er det et karakteristisk midlere temperatursprang på  $\Delta\theta/\theta \approx 0.03$ , slik at Froude-tallet blir  $U/c_r = U/\sqrt{(\Delta\theta/\theta)gD} \sim 0.7$ . I idealiserte modeller er det rasjonelt å karakterisere stratifikasjon i laget over inversjonen med en konstant Brunt-Vaisaila-frekvens:  $N = [(g/\theta)\partial\theta/\partial x_3]^{1/2}$ . For vær-situasjonen 01-05-2005 kl

14:00 er dette vanskelig, men grovt sett er laget over inversjonen iallefall stabilt, si:  $N \sim 10^{-2} s^{-1}$ . Tidligere analyser tilsier at lebølger opptrer når Froude-tallet er mindre enn:  $(U/c_r)^2 < \text{Tanh}(ND/U)/(ND/U) \sim [1 - (1/3)(ND/U)^2] \sim 1$  Høyden på Svartfjellet er ca  $H \approx 600$  m, og karakteristisk forhold mellom bølgeamplitude og bølgelengde blir da ca:  $H/\lambda \sim H/D(2\pi U/c_r)^{-1} \sim 0.1$  ( $NH/U \approx 0.6$ ) (Baines 1995, Vosper 2004, Sheridan and Vosper 2005). Dette indikerer at le-bølger med moderate amplituder skulle dannes over Hammerfest den 01-05-2005 kl 14:00.

Prediksjonene for denne vær-situasjonen er illustrert på figurene 3 – 9. Figurene 3 og 4 illustrerer strømmen på regional skala, og figurene 5, 6 illustrerer strømmen på lokal skala. Fjellbølger med betydelige amplituder opptrer, og strømmingen over og nordøst for rullebanen er rotor-lignende med kraftig turbulens. Det finnes områder i nærheten av Hammerfest der maksimal turbulens er opp mot  $\sqrt{K} \approx 4.0$  m/s, noe som må betraktes som sterk turbulens (Eidsvik 2006). Når le-bølgene har så stor amplitude som dette, kan de også bryte og da er det ikke mulig å predikere i detalj hvordan og hvorhen slike ikke-lineære ustabiliteter kan opptre i en aktuell situasjon. Da må vi være fornøyd med å predikere den generelle strukturen av strømmen, som for eksempel at rotorstrømning og bølgebrytning er sannsynlig.

Figur 7 illustrerer strømmen i et vertikallplan gjennom rullebanens senterlinje. Figuren viser predikerte verdier for hastighetskomponenter, turbulensintensitet og lengdeskala for både regional og lokal skala. Det er klart at prediksjonene på de to skalaene er forskjellige i nærheten av flyplassen, og dette er årsaken til at nesting er ønskelig. For eksempel: På den mest lokale skalaen estimeres et område med lite sidevind i lav høyde ca 1.5 km fra rullebane 05. Dette er ikke representert på den større skalaen (Figur 7). Likevel er midlere vind og temperatur estimert rimelig likt i de to simuleringene. Turbulensintensiteten estimeres imidlertid noen steder vesentlig større på den minste skalaen. Området med lite sidevind ca 1.5 km fra rullebane 05 genererer høyere vindskjær, slik at på den minste skalaen er det et maksimum i turbulensintensitet på  $\sqrt{K}/U \approx 0.18$  i 400 m høyde ca 1.3 km fra rullebane 05. Ca 500 m over rullebanens nordøstlige kant er maksimal turbulensintensitet  $\sqrt{K}/U \approx 0.16$  i den regionale simuleringen mens den er  $\sqrt{K}/U \approx 0.24$  i den lokale simuleringen. Siden turbulens produseres av vindskjær, som har mye energi på liten skala, kan turbulensintensiteten derfor bli vesentlig underestimert når gridoppløsningen er for sparsomt, noe som er normalt ved modellering av geofysiske strømmer. Med de begrensningene på gridoppløsning som operative varslingsmodeller fortsatt må benytte, kan altså turbulensintensiteten bli underestimert med en faktor av størrelsesorden 1.5 når terrenget er bratt og uregelmessig, som tilfellet er ved Hammerfest. Slike unøyaktigheter må aksepteres når spørsmålet er prediksjon av turbulens i aktuelle geofysiske strømmer.

Selv om det er betydelig midlere vindskjær og vertikalvind langs begge innflygings-retningene, er de likevel moderate. Langs innflygingsbanen mot rullebane 06 er forventet vindforhold, illustrert i Figur 8, også moderate. Maksimal turbulensintensitet umiddelbart før landing er bare ca  $\sqrt{K} \approx 1.5$  m/s.

Figur 9 illustrerer tre realisasjoner av den såkalte F-faktoren for et fly med en fart på  $c = 75$  m/s og en responsdistanse  $l_f \approx 500$  m (Eidsvik et al 2004, Eidsvik 2006). For enkelhets skyld er realisasjoner av turbulens langs flybanen modellert som en første ordens autoregressiv prosess (Box and Jenkins 1972, Eidsvik 2006). Integralskalaen for de to horisontale hastighetskomponentene anslås til  $l_{t1} \approx l_{t2} \approx D \sim 1$  Km og  $l_{t3} = l_t \sim 0.4x_3$  estimeres i SIMRA-modellen. Det er forutsatt at

tiden mellom innflygingene er større enn ca  $l_{t1}/U \sim 1$  min., slik at de forskjellige innflygingene blir utsatt for stokastisk uavhengige vindvariasjoner. Den positive F-verdien ca 8.5 km fra landing, og den negative F-verdien ca 6.5 km fra landing, er begge hovedsakelig assosiert med midlere vertikalvinden i disse områdene, der det også er lite turbulens (Figur 7, 8). Flyforholdene langs innflygingen estimeres altså rent “teknisk” som ufarlig.

Figur 10 illustrerer hvordan vinden langs tre innflyginger langs kort finale til rullebane 05 estimeres på det mest detaljerte gridet den 1-5-2005 kl 14:00 (tre realisasjoner). Som ventet er variasjonene her omtrent en faktor 1.5 større enn for det grovere gridet. Under den realisasjonen som er representert ved den heltrukne linjen opplever flyet en sidevindskomponent på ca 5 m/s fra omkring 1 km til 500 m fra banen. Over det samme intervallet opplever flyet en vertikalvind på ca 3 m/s. Omkring 400 m (5 s) fra rullebanen faller både sidevinden og stigevinden plutselig, og det vil oppleves som et betydelig vindskjær i en fase der flyet har lav hastighet og er i lav høyde (Eidsvik 2006). For andre innflygninger vil både vertikalvindkomponenten og medvindskomponenten kunne blitt vesentlig forskjellige (Figur 10). Likevel, vindforholdene estimeres ikke rent “teknisk” som dramatiske langs flybanen.

Turbulensintensiteten umiddelbart over flyplassen estimeres imidlertid som bemerkelsesverdig stor, helt opp mot  $\sqrt{K} \approx 4.0$  m/s (Figur 6). Med gridargumentasjonen ovenfor er denne verdien sannsynligvis et underestimat og med usikkerheten om hvorhen maksimal turbulens vil være når det er dramatisk strømming som dette, er det betydelig risiko for at maksimal turbulens langs innflygningsbanen kan være 3.5 m/s istedet for 1.5 m/s. Det betyr at F-faktoren i Figur 9 kan væ underestimert med en faktor av omtrent 2 og det betyr at sjansen for  $F < -0.1$  blir betydelig. Dette er det normale “warning level” ved eksisterende systemer for vindskjær- varsling (Eidsvik 2006).

Kunne man ha visst noe om slike flyforhold ved hjelp av bare bakkeobservasjoner av vind? Midlere bakkevind over rullebanen var så svak som ca 2.0 m/s fra omkring 200 grader, og med en turbulensintensitet som var minst så stor som  $\sqrt{K} \approx 1.5$  m/s. Det betyr at den aktuelle lokale vindretningen varierte rundt hele vindrosen, med en tendens til bane 23. Dersom høydevinden, U, hadde vært svak, ville dette betydd fine flyforhold. Med sterk stratifisert strømming fra sørøst var imidlertid flyforholdene langs finalen til bane 23 svært turbulent (Figur 7).

Estimering av stratifikasjon, karakteristisk vindstyrke og vindretning over fjellene er derfor viktig. I flere tilfeller kan slik informasjon være tilgjengelig fra fly og radar.

## 2.3 Vind fra ca 140 grader

Figurene 11, 12, 13, og 14 illustrerer lokal strømming når vindretningen fra UM1-beregningen dreies 30 grader mot klokken. Siden Froude-tallet og oppdriftsparameteren N, er uendret, vil også denne strømmen være dominert av fjellbølger med stor amplitude.

Ved flyplassen er midlere sidevind og motvind fra nordøst økt noe, men det mest signifikante er fortsatt at maksimal turbulensintensitet i området over Hammerfest er så stor som  $\sqrt{K} \approx 3.0$  m/s.

## 2.4 Vind fra ca 200 grader



Figurene 15, 16, 17 og 18 illustrerer lokal strømming når vindretningen fra UM1-beregningen dreies 30 grader med klokken. Froude-tallet og oppdriftsparameteren  $N$ , er uendret, og denne strømmen vil derfor også være dominert av fjellbølger med stor amplitude. Strømmen i fjellhøydenivå vil imidlertid nå ha forholdsvis liten vinkel i forhold til de nordøstlige høydedragene både ved Svartfjellet og i området Storfjellet-Miilet, slik at dannelsen av tyngdebølger blir mindre effektiv.

Ved flyplassen er midlere sidevind nå liten, med tydelig bakkevind langs rullebanen. Med innflyging mot bane 23 er maksimalverdien av turbulensintensitet redusert til  $\sqrt{K} \approx 2.0$  m/s, som kan karakteriseres som moderat turbulens (Eidsvik 2006).

## 3 Diskusjon

Ved nær nøytrale strømningsforhold fra nordvestlig retning vil det dannes et resirkulasjonsområde over Hammerfest lufthavn. Dette gir både store midlere vindskjær og turbulensintensitet. Grovt sett er maksimal turbulensintensitet i resirkulasjonsboblen bak et fjell omkring  $\sqrt{K} \approx 0.25U$  (Utnes and Eidsvik 1996). Sterk turbulens, som vanligvis estimeres som  $\sqrt{K} \geq 3.5$  m/s, er da ekvivalent med en vindstyrke over fjellene på  $U \geq 15$  m/s.

I nær nøytrale strømningsforhold fra sørøstlig retning kan det også dannes et resirkulasjonsområde foran en så bratt fjellvegg som sørøstsiden av Storfjellet-Miilet. Dette resirkulasjonsområdet er imidlertid mindre både av utstrekning og intensitet enn det som er bak fjellet. Selv om en slik resirkulerende strømming kan gi interaksjoner med småskala terreng og bygninger, er denne typen av strømming antakelig ikke risikabel for flyging sålenge  $U \leq 15$  m/s..

For sørøstlige strømmer er antakelig stratifikasjonen mer viktig, og det er strukturen av slike strømmer som er fokusert i denne studien. Værforholdene den 1-5-2005 kl 14:00 er representativ for slike forhold, og simuleringene viser tyngdebølger med store amplituder og sterk turbulens. Turbulensintensiteten er estimert til å være minst så høy som i et nøytralt skiktet resirkulasjonsområde. Tidligere simuleringer på detaljerte grid (Eidsvik and Utnes 1997) og eksperimentell erfaring tilsier at maksimal turbulensintensitet i slike strømmer kan bli enda høyere, helt opp mot  $\sqrt{K} \approx 0.5U$ , d.v.s  $\sqrt{K} \sim 7.0$  m/s . Dette betyr at stratifiserte sørøstlige strømmer over Hammerfest kan være minst like risikable som nordvestlige. Imidlertid, når vindretningen over fjellene får en positiv vestlig komponent, ser det ut til at tyngdebølgene får mindre amplitude langs de vanlige flytraseene.

### 3.1 Informasjon fra lokale målinger

Varslingssystemet representerer en nedskalering av varsler for storskala meteorologisk strømming, inkludert de varslingsfeil som ligger i det. Det ville være ønskelig å kunne utnytte lokale data til å estimere hvor nøyaktig værvarslet er. Det beste ville være gode data for aktuell vind og stratifikasjon over fjellene (i ca 1000m høyde). Enkelte steder og tider kan dette estimeres fra radar eller fly, og det ville være rasjonelt å få gjennomført en systematisk innsamling av slike data.

Meteorologiske data fra bakkenivå er flertydige. Anta at minst en av vindmålerne på flyplassen viser svak middelvind og store variasjoner i vindretning, som den 1-5-2005 kl 14:00. Dersom vinden over fjellene også er svak, betyr dette fine flyforhold.

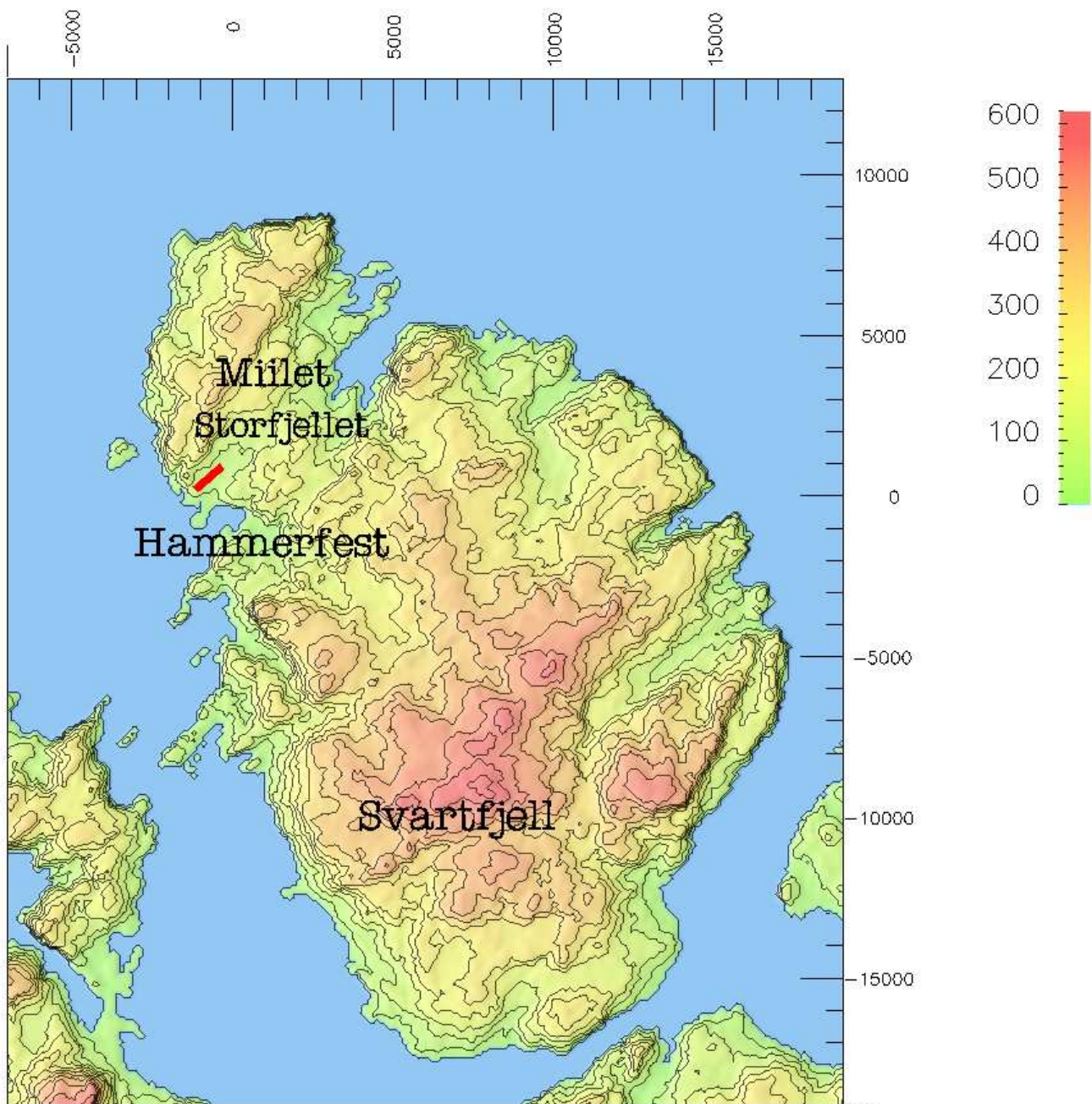
Dersom vinden over fjellene derimot er så sterk som  $U \geq 17$  m/s, med signifikant nordvestlig eller sørøstlig komponent, betyr det derimot risikable flyforhold.

Figur 10 illustrerer at bakkeobservasjoner av aktuelle horisontale vindkomponenter iallefall kan være representative over en viss horisontal distanse og tid:  $(l_{t1}, l_{t1}/U) \sim (1 \text{ km}, 1 \text{ min.})$  .

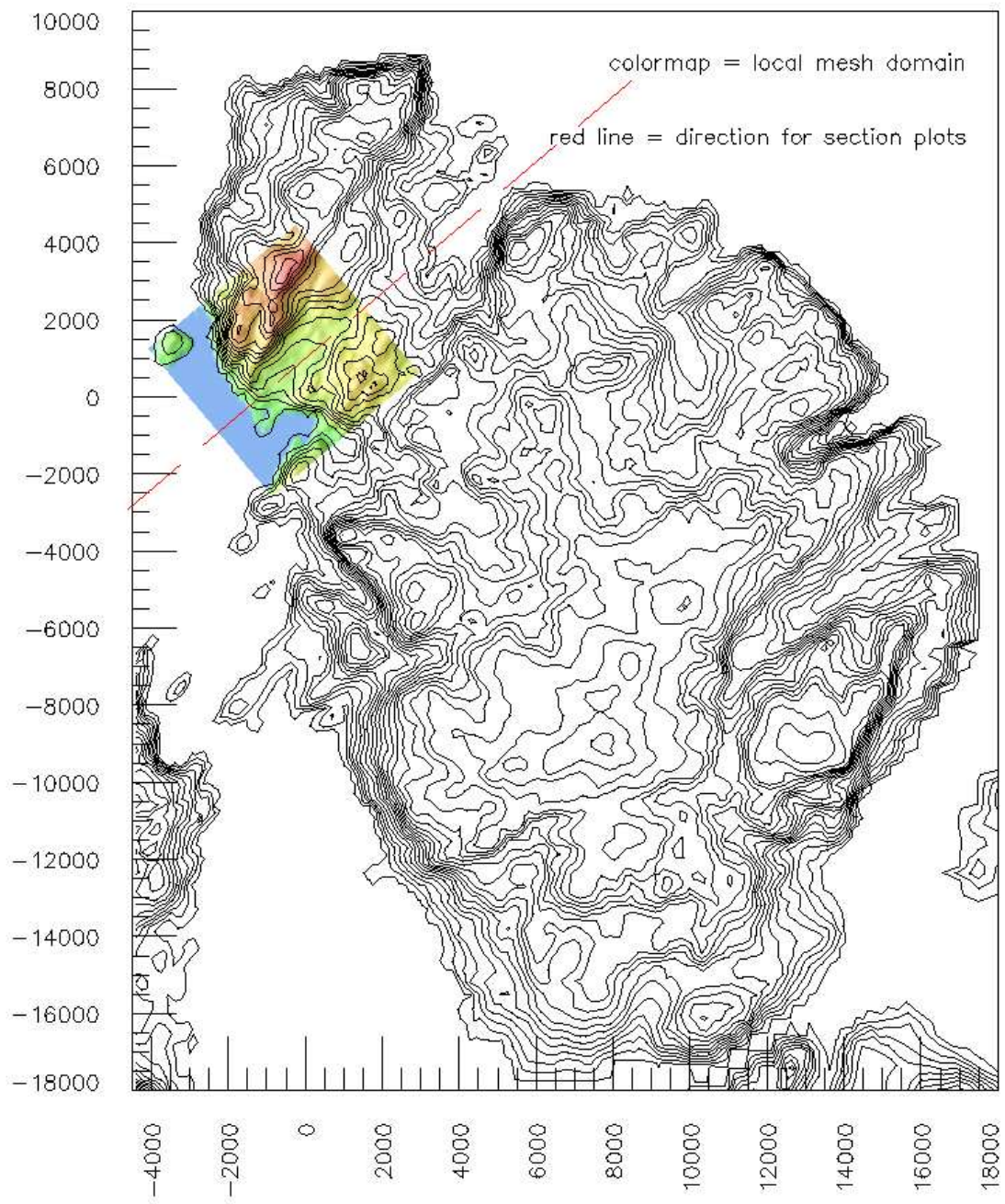
## 4 Referanser

- Baines P.G. (1995): Topographic Effects in Stratified Flows. Cambridge Monographs on Mechanics. 1995 482 pp
- Belcher S.E., Hunt J.C.R. (1998): Turbulent Flow over Hills and waves. Annu.Rev. Fluid. Mech. Vol 38 pp 507-38
- Boyer D.L., Davies P.A. (2000): Laboratory Studies of orographic Effects in rotating and stratified Flows. Ann.Rev.Fluid Mech. Vol XXX, pp 165–202
- Box G.E.P, Jenkins G.M. (1970). Time Series Analysis, Forecasting and Control. Holden Day 553 pp.
- Eidsvik K.J., Utnes T. 1997): Flow separation and hydraulic transition over hills modelled by the Reynolds equations. Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics. Vol 67+68 pp 403-413
- 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
- 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
- Eidsvik K.J (2006): Predictions of local atmospheric flows based upon the Reynolds averaged equations, applied to aviation safety. SINTEF manuskript
- Kaimal J.C., Finnigan J:J (1994): Atmospheric Boundary Layer Flows, Their Structure and Measurement. Oxford University Press 1994.
- Lie I., Utnes T., Blikberg R. 2003. On preconditioned iterative solution of distributed sparse linear systems in SIMRA. <http://balder.ntnu.no/ttp>
- Panofsky H.A.and Dutton J.A. (1985): Atmospheric Turbulence.John Wiley,New York. 397pp.
- Riley and Lelong (2000): Fluid Motions in the presence of strong stable Stratification. Ann. Rev. Fluid Mech. Vol 32 pp 613–657
- Sheridan P.F., Vosper S.B. 2005: A flow regime diagram for forecasting lee waves, rotors and downslope winds. Manuscript 2005
- Utnes T. (2002): Numerical formulation of a semi-implicit Reynolds-averaged model (SIMRA). SINTEF Applied Mathematics
- Utnes T., Eidsvik K.J. (1996): Turbulent flows over mountains modelled by the Reynolds equations. Boundary-Layer Meteorology. Vol 79 pp 393-416
- Vosper S.B. (2004): Inversion effects on mountain lee waves. Q.J.R. Meteorol. Soc. Vol 130 pp 1723–1748

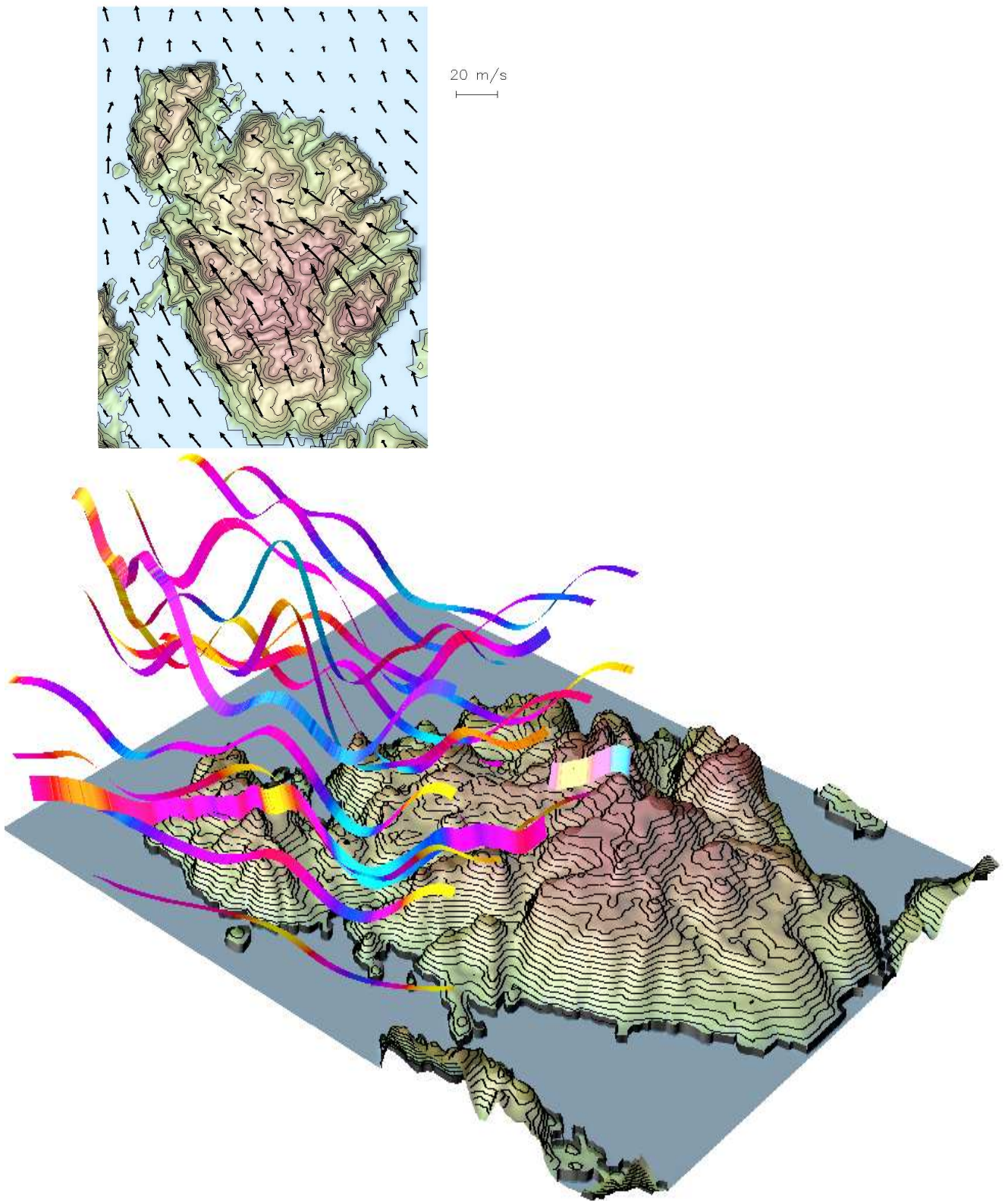




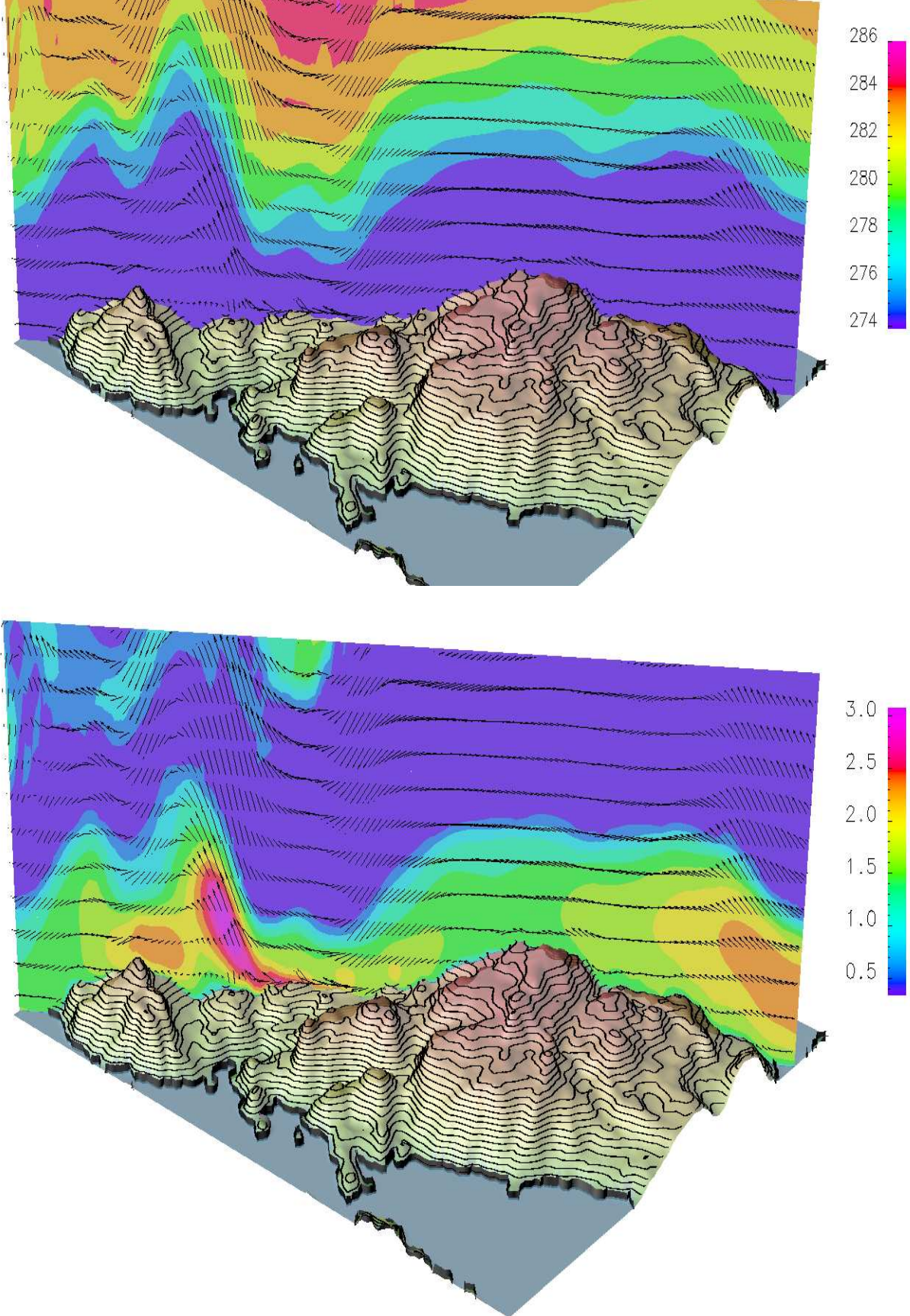
Figur 1: Regionalt beregningsområde over Kvaløya med Hammerfest. De høyeste fjellpartiene og rullebanen er markert på kartet.



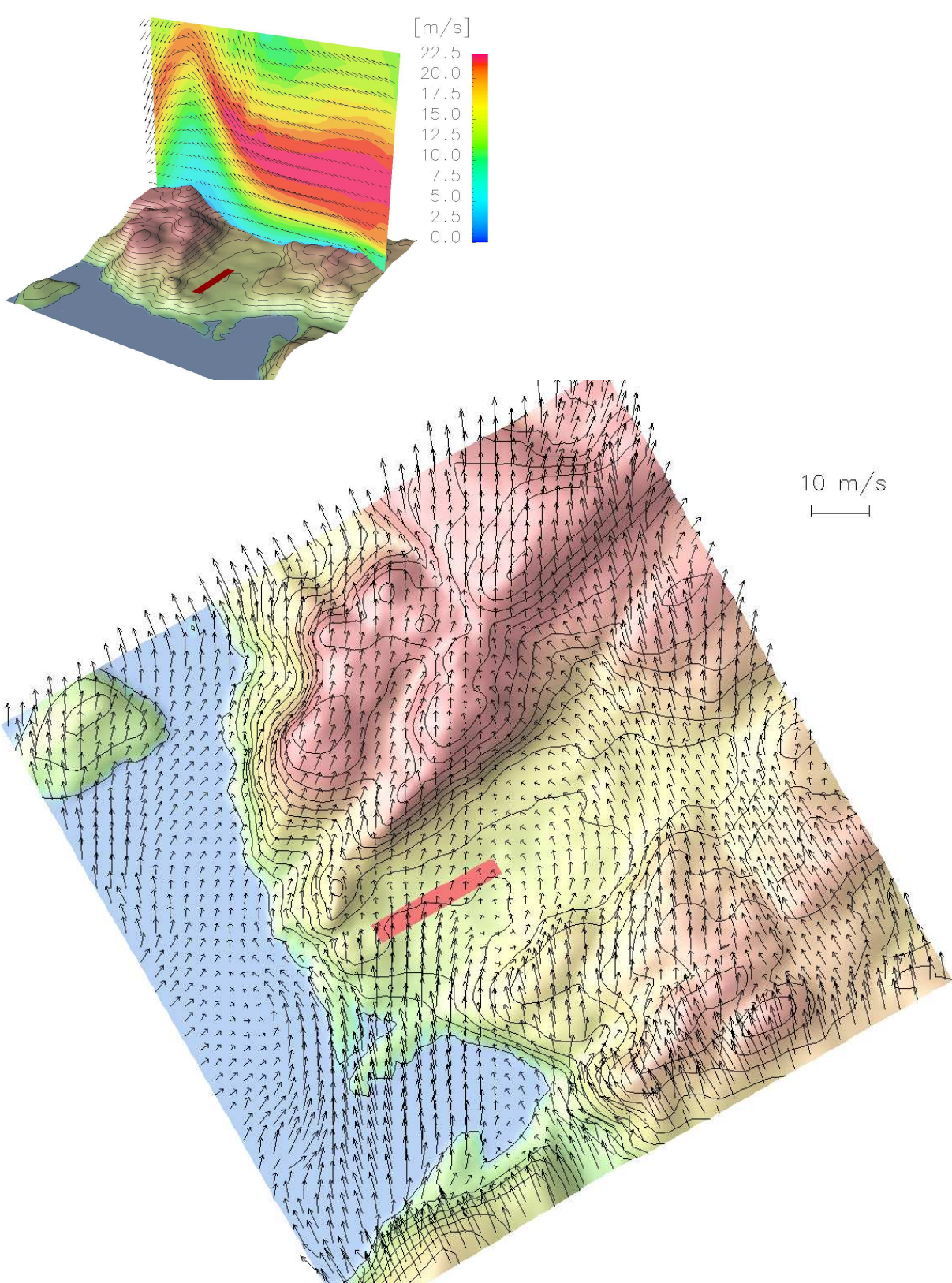
Figur 2: Regionalt og lokalt område for simuleringer med Simra. Det lokale området (farget) har en utstrekning på (5 x 5) km. Rullebanens sydvestlige terskel ligger ved ca (-1.0, 0.5) km. Rød stipleet linje indikerer retningen for vertikalplott som er vist i rapporten.



Figur 3: Regionalt område: Værsituasjonen 1/5-2005, kl 14:00. Prediktert vind i 2 km høyde (øverst), og predikterte partikkelbaner (nederst).

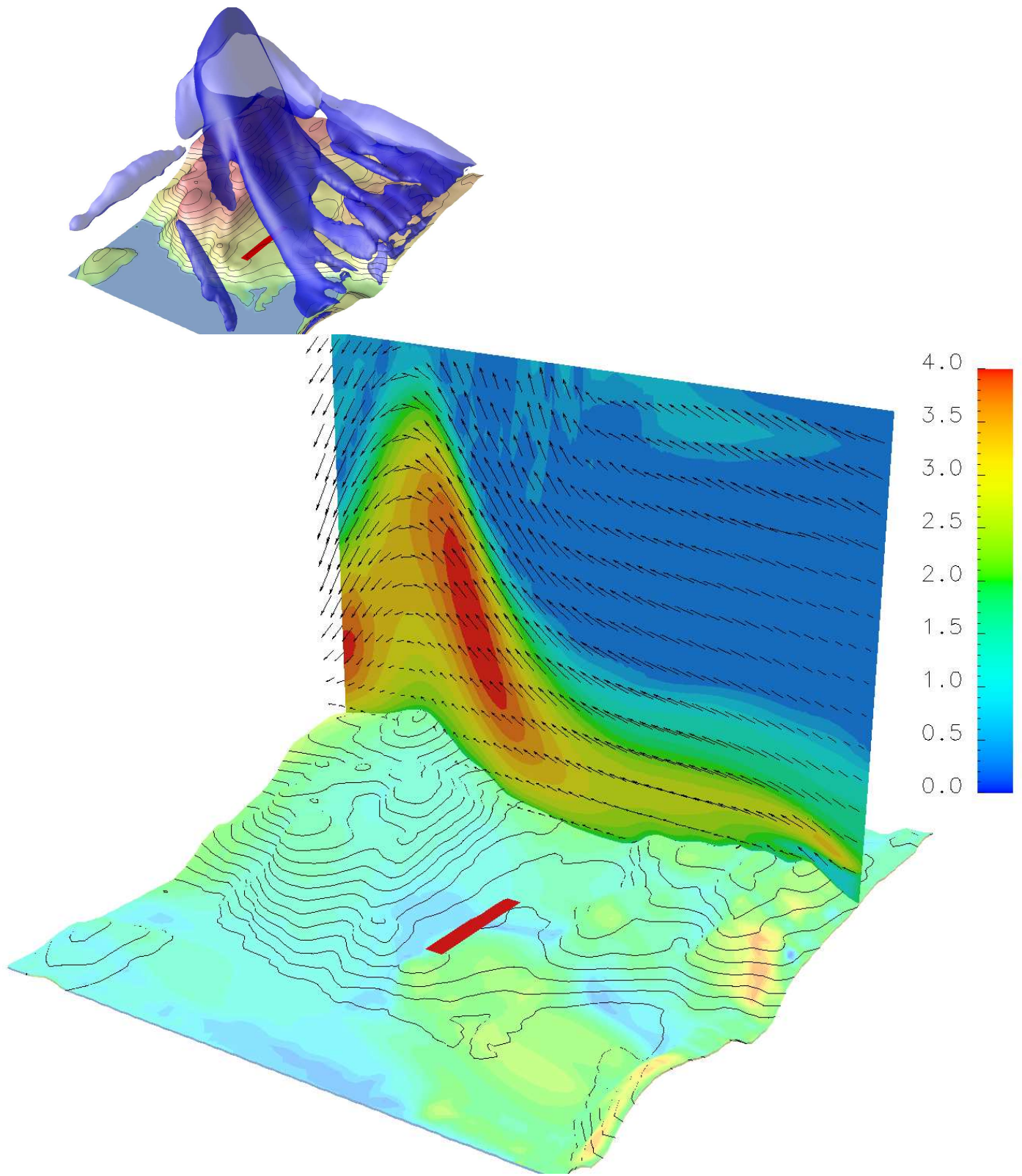


Figur 4: Regionalt område: Predikert potensiell temperatur (øverst), og turbulensintensitet (nederst) langs hovedvindretningen. Fargeskala viser turbulensintensitet  $\sqrt{K}$  (m/s).

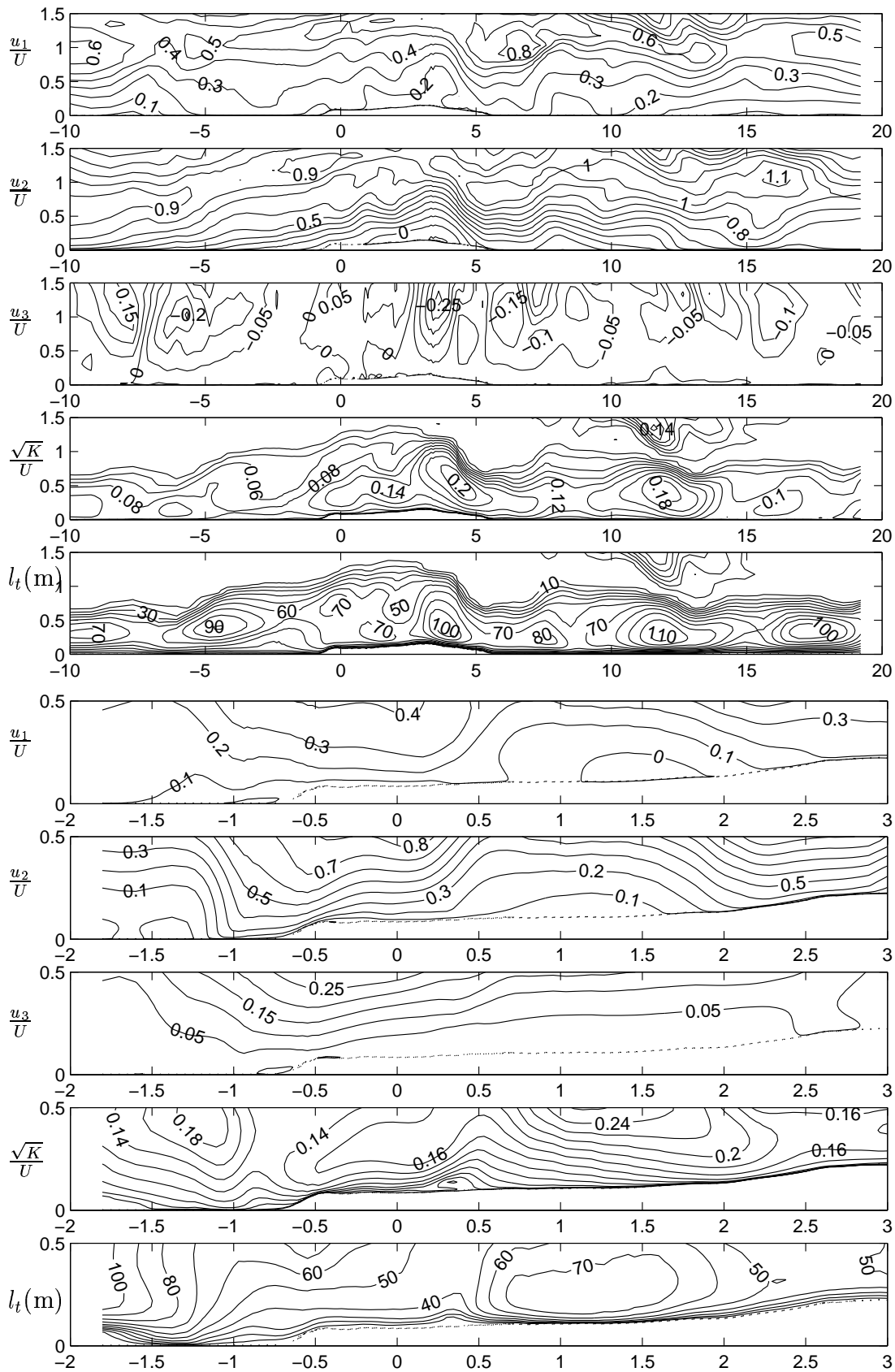


Figur 5: Lokalt område: Prediktert vindfelt i vertikalsnitt (øverst) og nær bakkenivå (nederst). Fargeskala på øverste figur viser absoluttverdi av vindhastigheten.

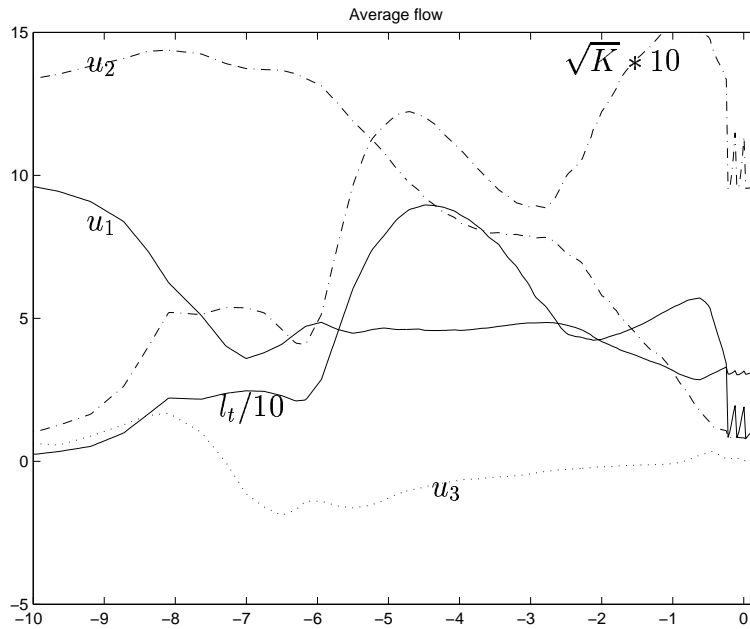




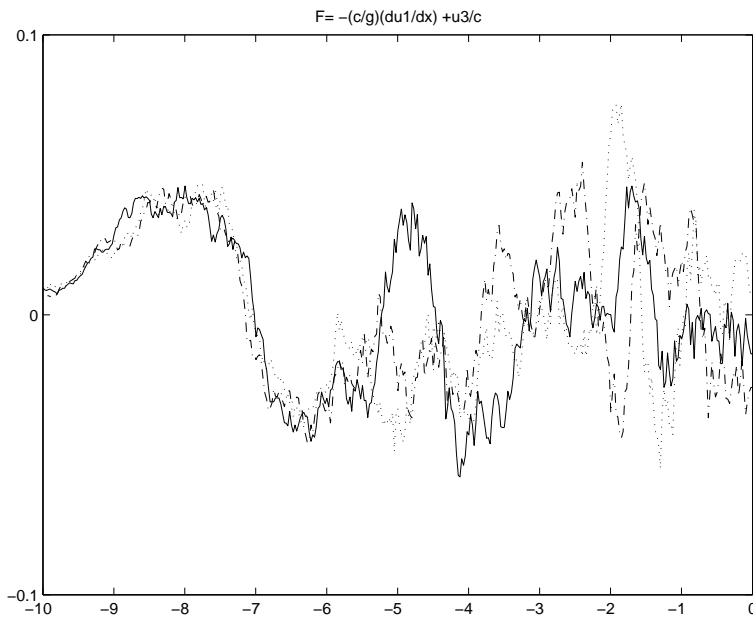
Figur 6: Prediktert turbulens for lokalt område. Øverst er vist isoflate for  $\sqrt{K} = 3.0$  m/s; nederste er vist turbulens i bakkenivå og vertikalsnitt. Fargeskala for  $\sqrt{K}$  (m/s).



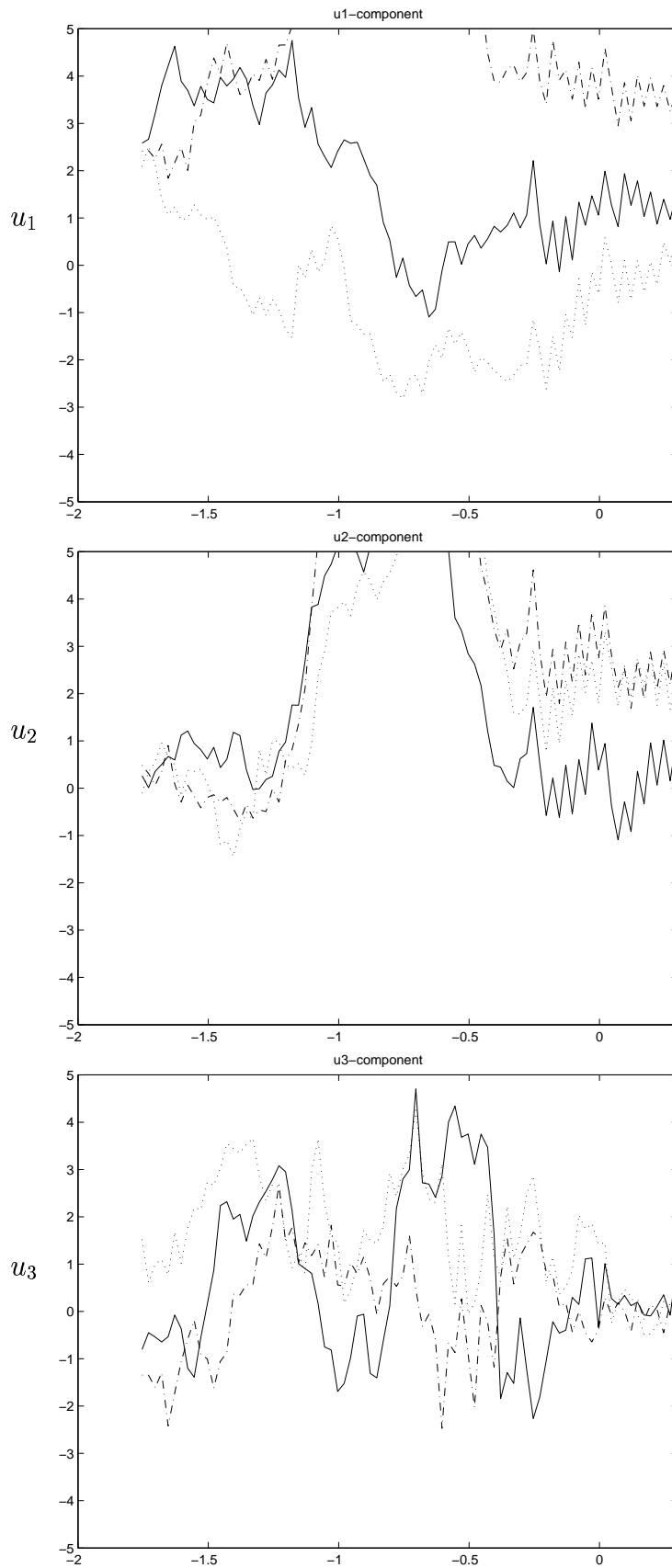
Figur 7: Vertikalsnitt i rullebanens retning (50 grader), jfr. Figur 2. Isolinjer for: (a) Medvindskomponent  $u_1/U$ , (b) Sidevindskomponent  $u_2/U$ , (c) Vertikalkomponent  $u_3/U$ , (d) Turbulensintensitet  $\sqrt{K}/U$ , (e) Turbulent lengdeskala  $l_t$  (m). Koordinataksene i km, referansehastighet  $U=15.5$  m/s. Øverste 5 figurer: Regionale simuleringer. Laveste 5 figurer: Lokale simuleringer.



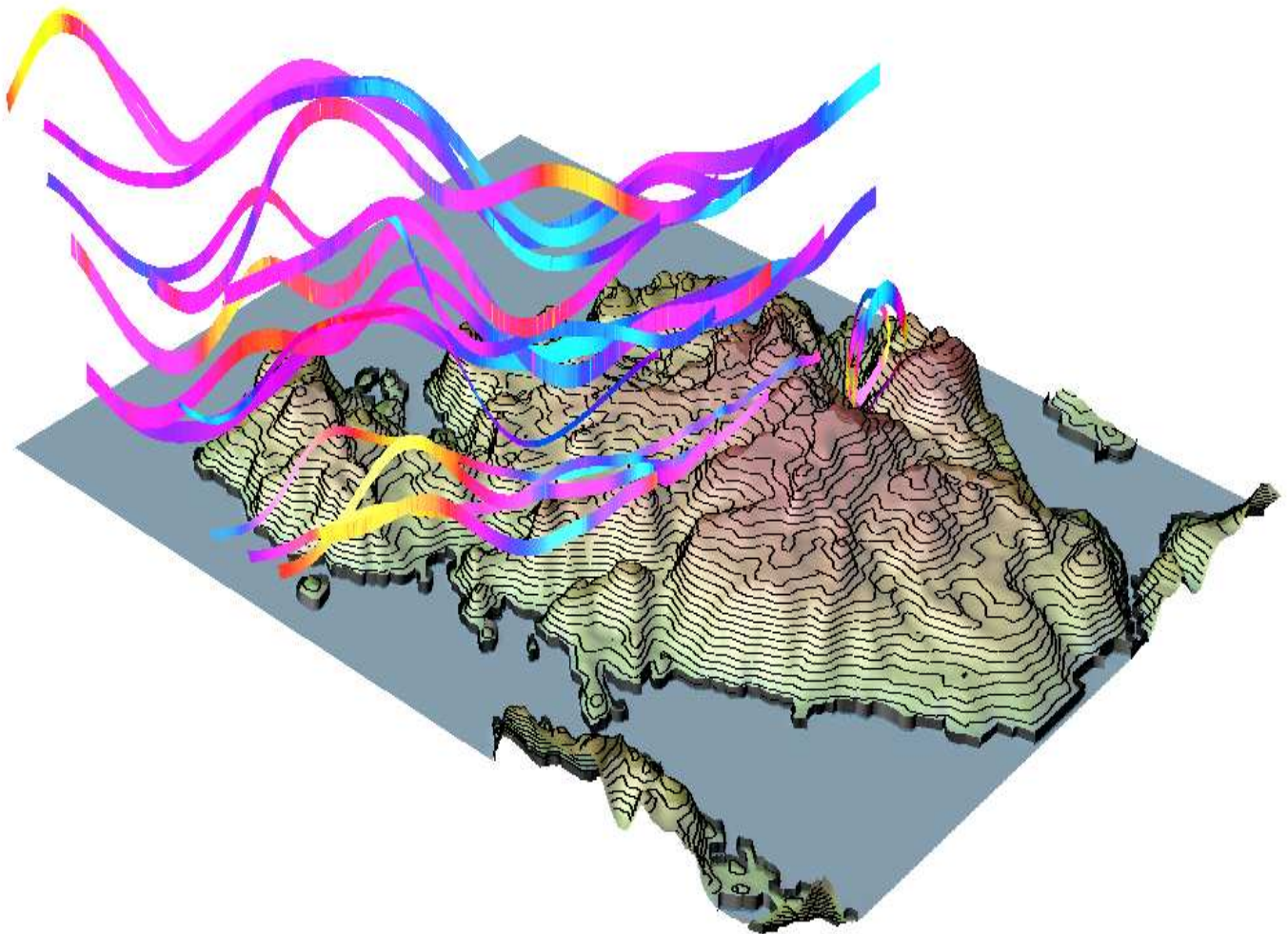
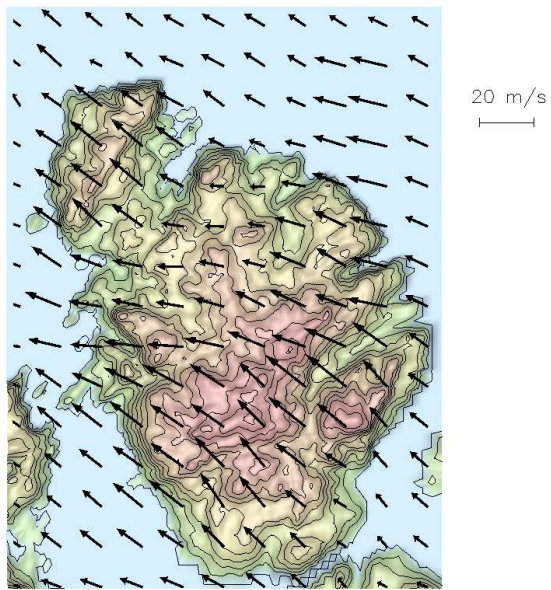
Figur 8: Predikert vindkomponenter, turbulensintensitet og turbulent lengdeskala langs lang finale til rullebane 05 Hammerfest, 1-5-05 kl 14:00. Distanse fra rullebanen i km., ellers SI-enheter.



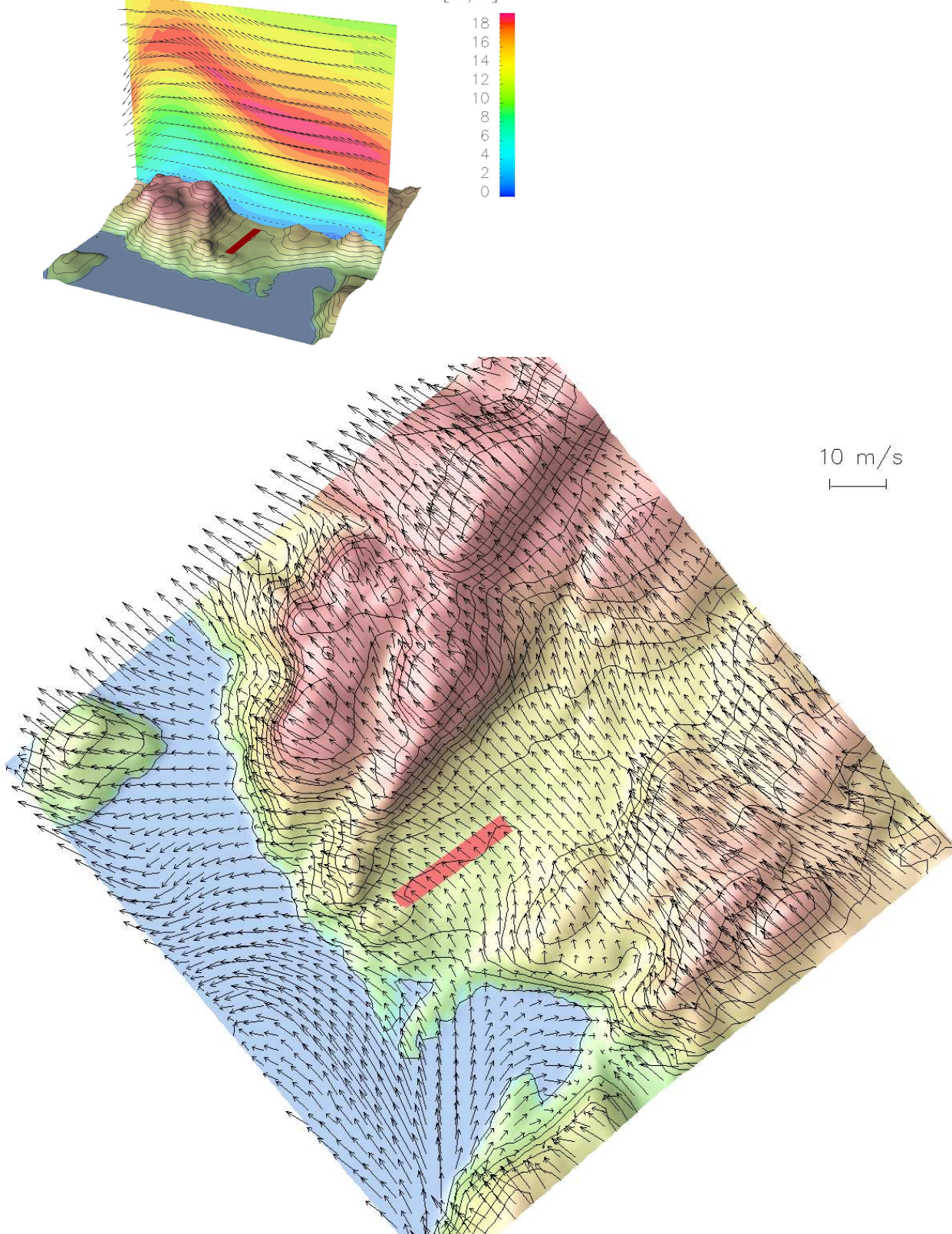
Figur 9: Tre realisasjoner av F-faktor langs lang finale til rullebane 05, Hammerfest. Horizontal akse viser distanse fra rullebanen i km. Dersom turbulensintensiteten underestimeres i prediksjonene betyr det at fluktuasjonene i F-faktoren underestimeres tilsvarende. Vanlige “alert” og “warning” nivåer er:  $F < -0.05$  og  $F < -0.1$ .



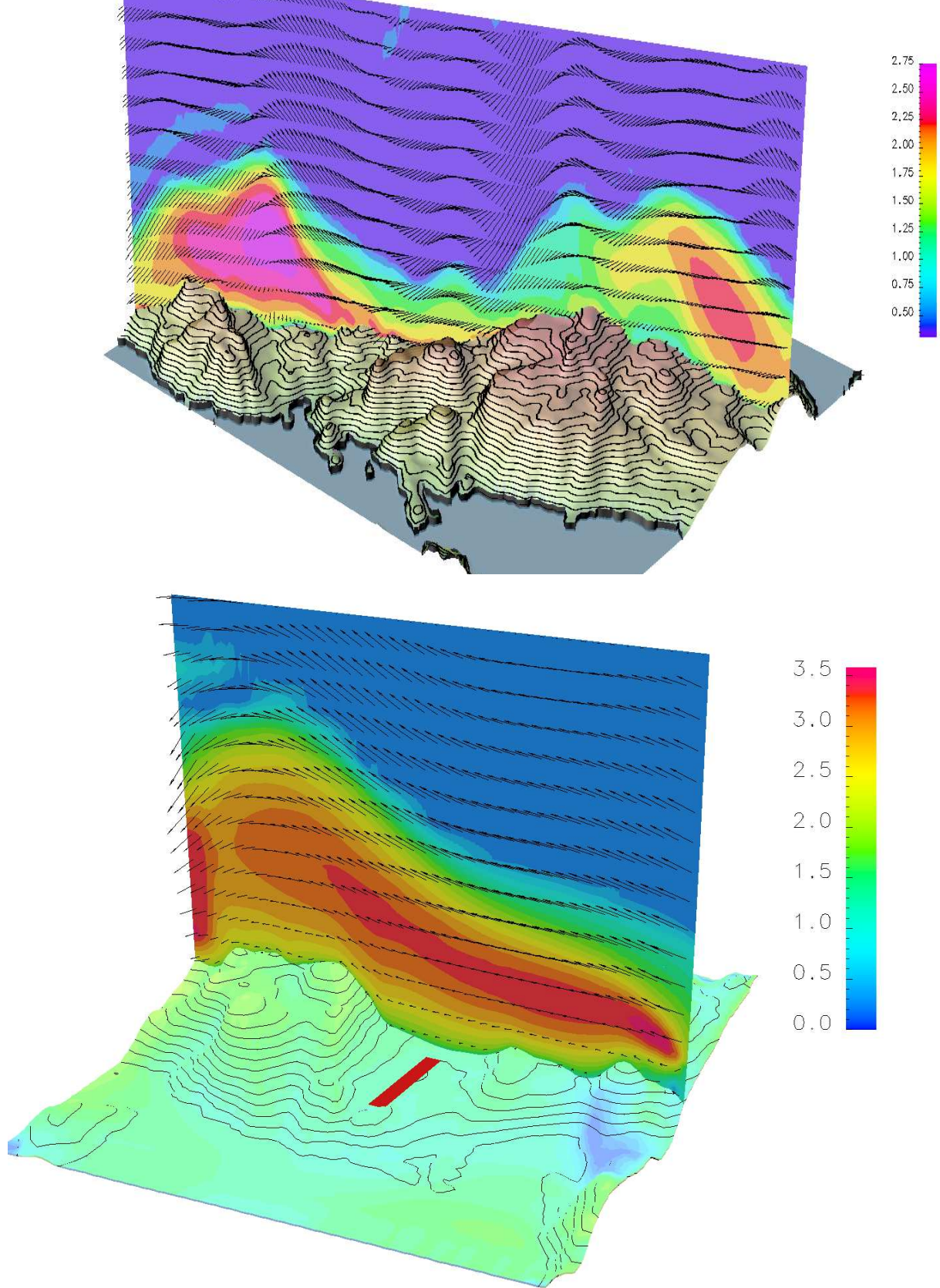
Figur 10: Tre realisasjoner av medvind, sidevind og vertikalvind (m/s) langs kort finale til rullebane 05 Hammerfest, 1-5-05 kl 14:00. Distanse fra rullebanen i km.



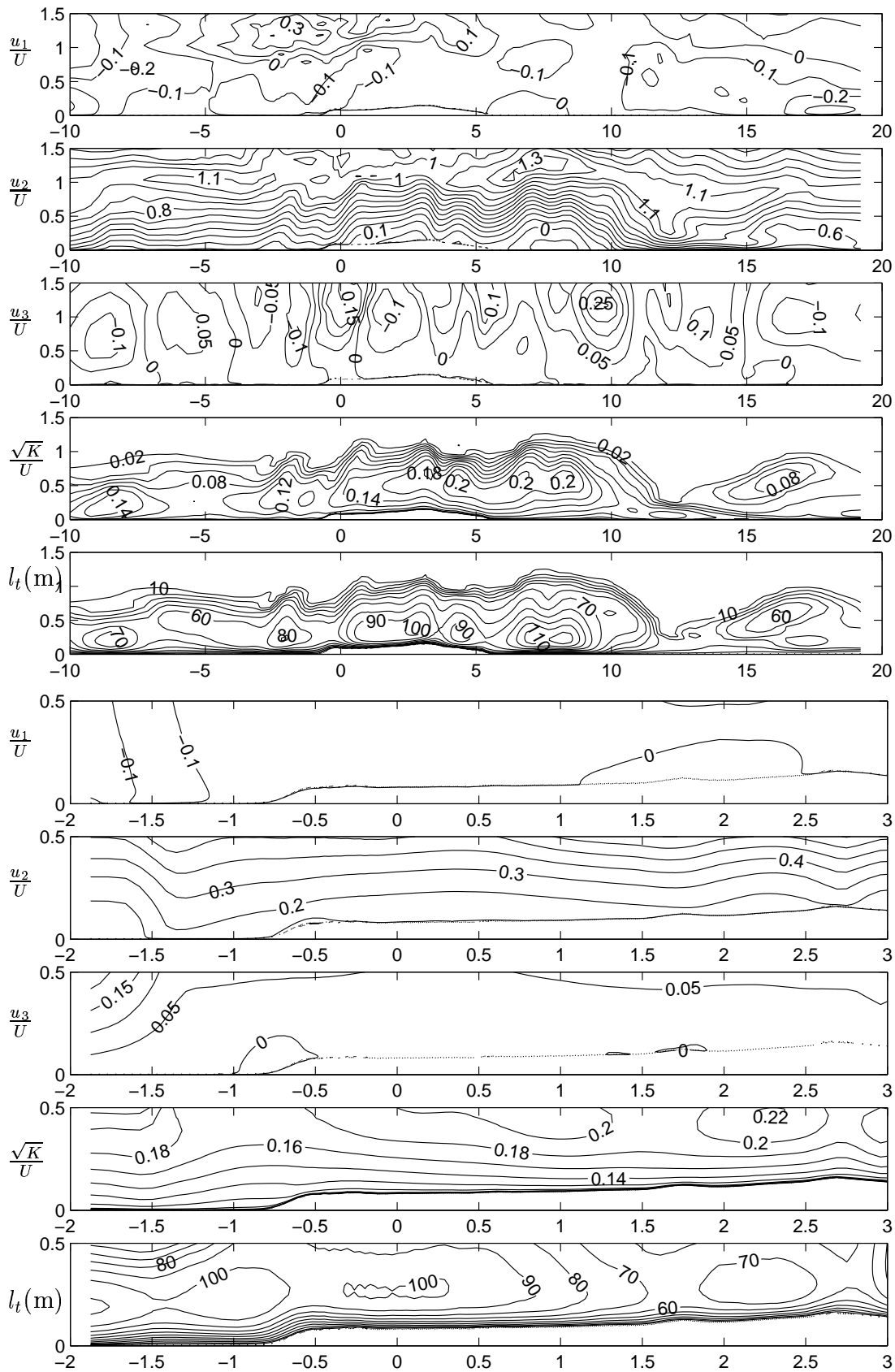
Figur 11: Vidfeltet rotert 30 grader mot solen i forhold til vær-situasjonen 01/05-2005, kl 14:00: Prediktert vind i 2 km høyde (øverst), og partikkelbaner (nederst).



Figur 12: Vindfeltet rotert 20 grader mot solen: Prediktert lokalt vindfelt i vertikalsnitt (øverst) og nær bakkenivå (nederst). Fargeskala på øverste figur viser absoluttverdi av vindhastigheten.

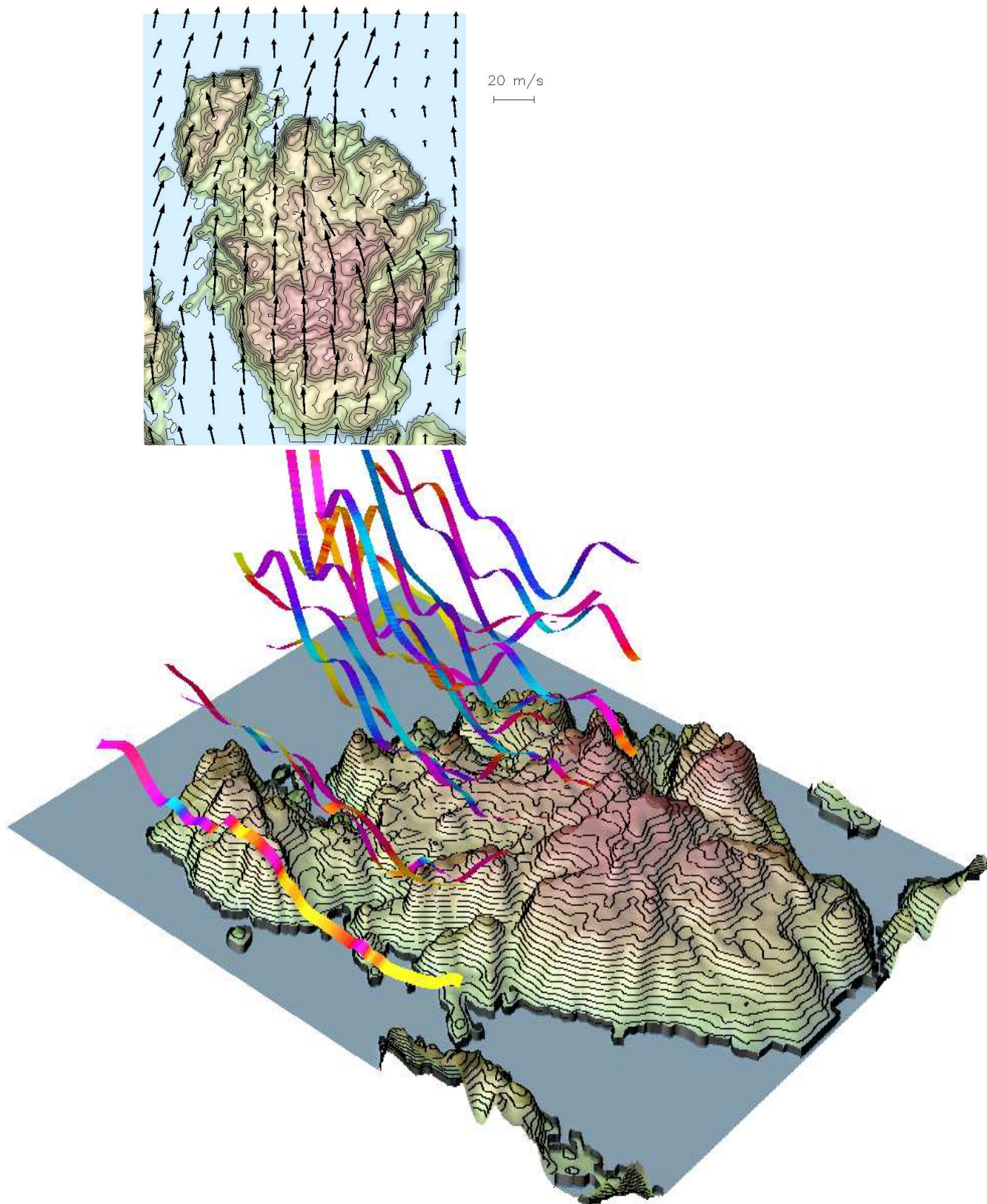


Figur 13: Vindfeltet rotert 30 grader mod solen: Predikert vind og turbulens for regionalt område (øverst); turbulens for lokalt område (nederst). Fargeskala for  $\sqrt{K}$  (m/s).

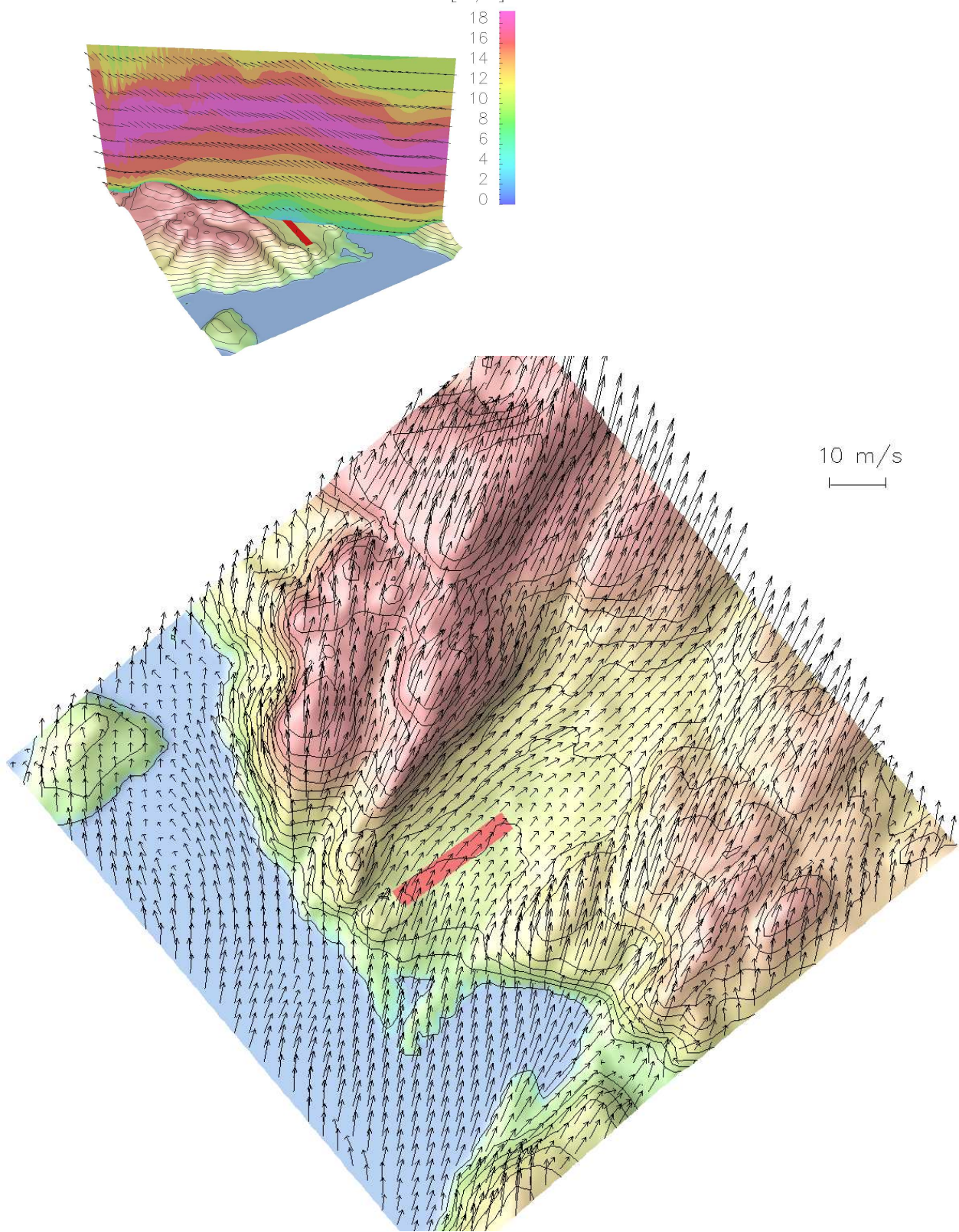


Figur 14: Vertikalsnitt i rullebanens retning (50 grader), jfr. Figur 2. Isolinjer for: (a) Medvindskomponent  $u_1/U$ , (b) Sidevindskomponent  $u_2/U$ , (c) Vertikalkomponent  $u_3/U$ , (d) Turbulensintensitet  $\sqrt{K}/U$ , (e) Turbulenslengdeskala  $l_t$  (m). Koordinataksene i km, referansehastighet  $U=15.5$  m/s. Øverste 5 figurer: Regionale simuleringer. Laveste 5 figurer: Lokale simuleringer. +30 grader

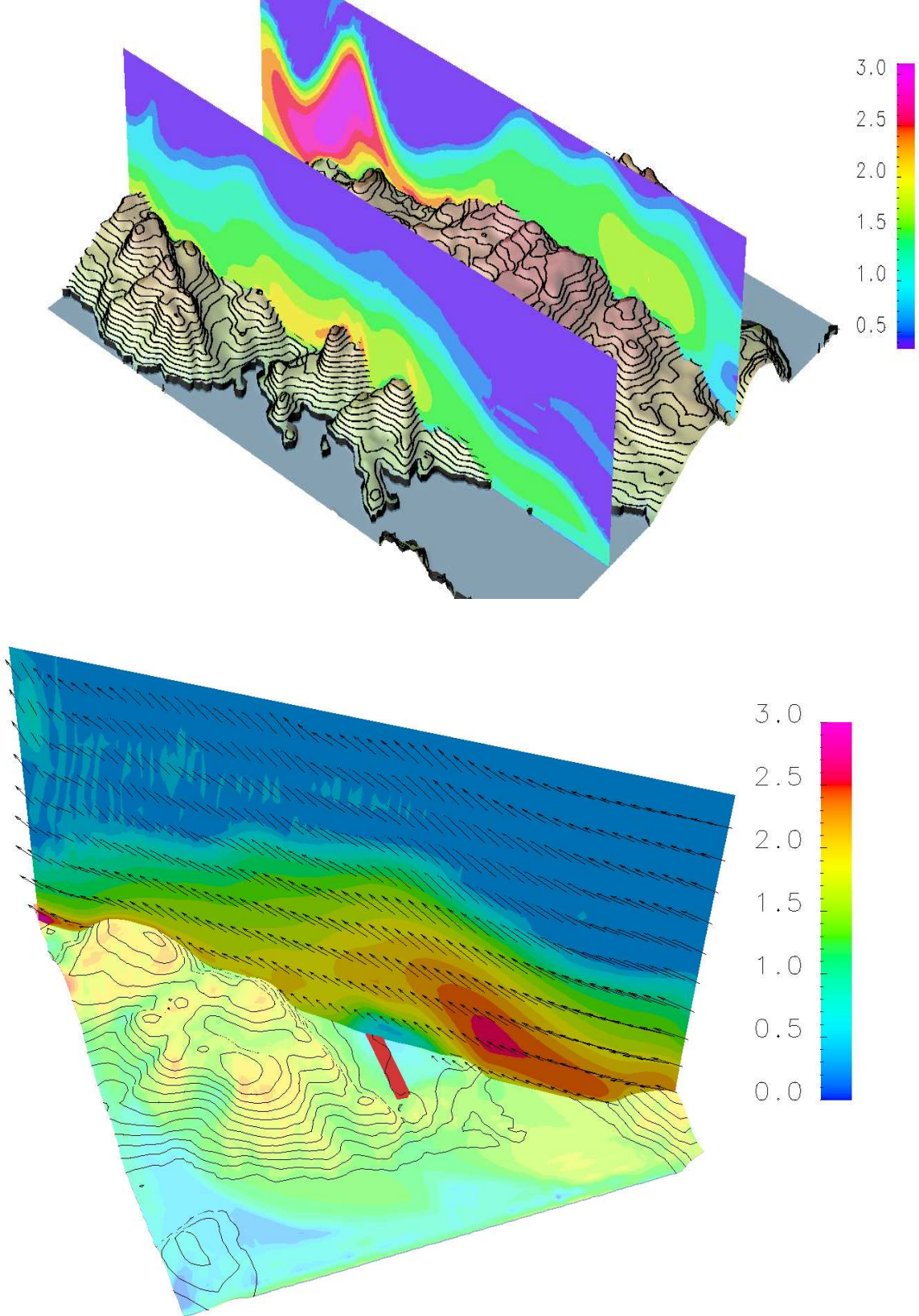




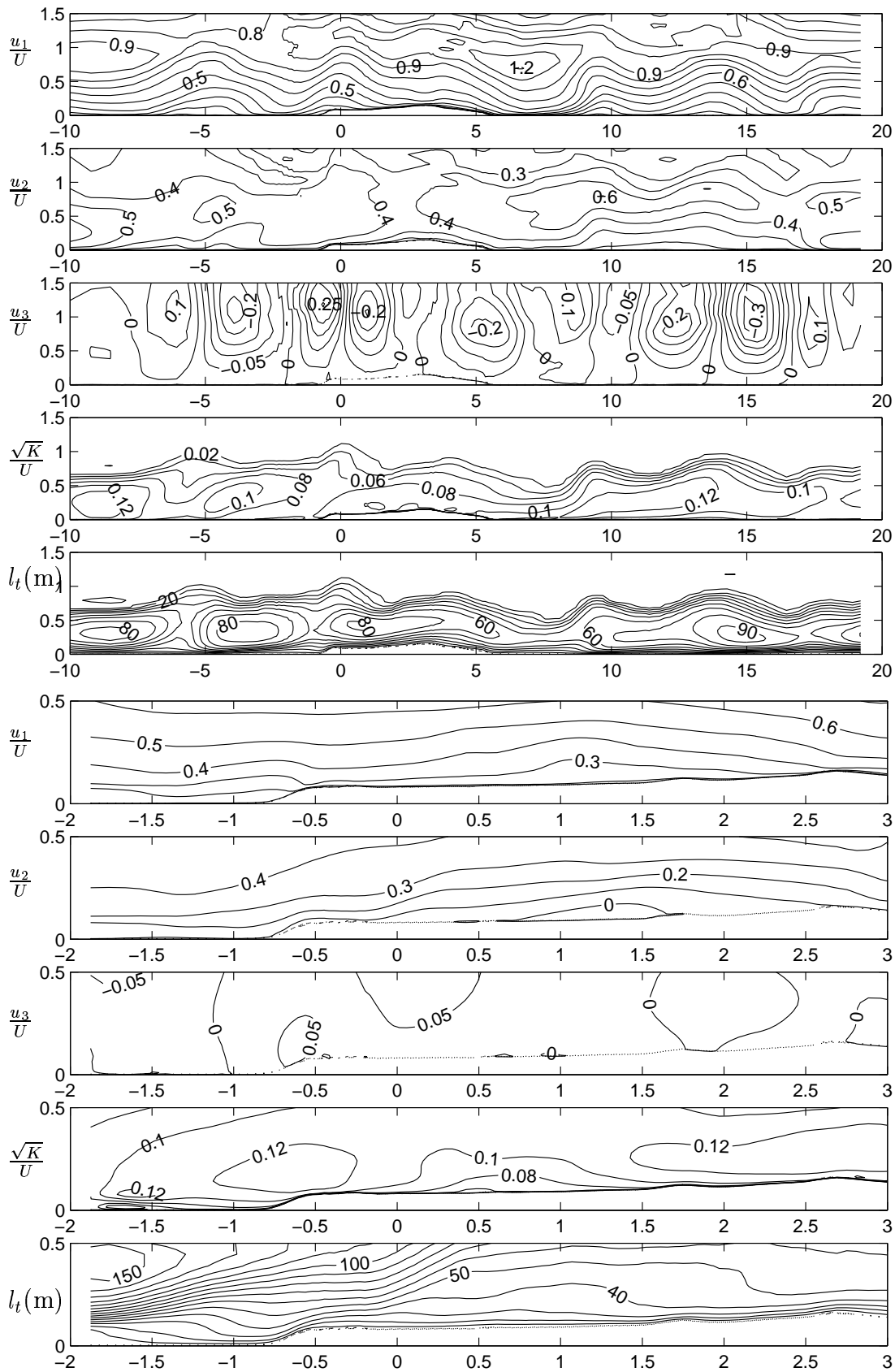
Figur 15: Vindfeltet rotert 30 grader med solen i forhold til værsituasjonen 01/05-2005, kl 14:00. Prediktert vind i 2 km høyde (øverst), og partikkelbaner (nederst).



Figur 16: Vindfeltet rotert 30 grader med solen: Prediktert lokalt vindfelt i vertikalsnitt (øverst) og nær bakkenivå (nederst). Fargeskala på øverste figur viser absoluttverdien av vindhastigheten.



Figur 17: Vindfeltet rotert 30 grader med solen: Predikert turbulensintensitet for regionalt område (øverst), og lokalt område (nederst). Fargeskala for  $\sqrt{K}$  (m/s).



Figur 18: Vertikalsnitt i rullebanens retning (50 grader), jfr. Figur 2. Isolinjer for: (a) Medvindskomponent  $u_1/U$ , (b) Sidevindskomponent  $u_2/U$ , (c) Vertikalkomponent  $u_3/U$ , (d) Turbulensintensitet  $\sqrt{K}/U$ , (e) Turbulens lengdeskala  $l_t$  (m). Koordinataksene i km, referansehastighet  $U=15.5$  m/s. Øverste 5 figurer: Regionale simuleringer. Laveste 5 figurer: Lokale simuleringer.-30 grader