

SINTEF A168 - Åpen

RAPPORT

Vindvariasjoner over Sørkjosen lufthavn estimert med numeriske simuleringer

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 Sørkjosen lufthavn estimert med numeriske simuleringer

FORFATTER(E)

Karl J. Eidsvik og Torbjørn Utnes

OPPDRAKSGIVER(E)

Avinor AS

RAPPORTNR. SINTEF A168	GRADERING Åpen	OPPDRAKSGIVERS REF. Erling Bergersen	
GRADER, DENNE SIDE Åpen	ISBN 82-14-02865-5	PROSJEKTNR. 90A260	ANTALL SIDER OG BILAG 23
ELEKTRONISK ARKIVKODE SINTEF A168.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 <i>for</i>	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Svein Nordenson, Research Director <i>Runeas Holdahl</i>	

SAMMENDRAG

Rapporten inneholder estimering av lokale strømmer i området rundt Sørkjosen lufthavn. Det er gjort beregninger for 4 forskjellige hovedvindretninger, nemlig vind fra sør-sørvest, vest-sørvest, vest-nordvest og nordøst. For tilfellet med sør-sørvestlig vind er det gjennomført beregninger både med og uten stratifikasjonseffekter.

På grunn av den kompliserte terrenget er det valgt et relativt stort geografisk område for beregningene, og det er grunn til å anta at fjellbølger er representert relativt godt med denne oppløsningen. Den realt grove gridoppløsningen gir imidlertid en tendens til underestimering av turbulensintensitet.

Nært nøytrale strømmer over så bratte fjell som dette vil gi separasjon, som resulterer i maksimal turbulensintensitet bak fjellene opp mot ca $\sqrt{K/U} \approx 0.25$. 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.

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

Vindvariasjoner over Sørkjosen lufthavn estimert med numeriske simuleringer

Utnes T., Eidsvik K.J.
SINTEF IKT Anvendt matematikk

23. mai 2006

Innhold

1	Innledning	2
2	Simuleringer	2
2.1	Simuleringsområde	2
2.2	Innløpsbetingelser	2
2.3	Vind fra sør-sørvestlig retning (200 grader)	3
2.4	Vind fra vest-sørvestlig retning (250 grader)	4
2.5	Vind fra vest-nordvestlig retning (290 grader)	5
2.6	Vind fra nordøstlig retning (45 grader)	5
3	Diskusjon	6

1 Innledning

Sørkjosen lufthavn ligger nær ca 1000m høye fjell og tett inn mot en sydøstlig fjellrygg langs Storhaugen - Sagdalsfjellet - Beassevarri (figur 1). Ved innflyging til bane 33 og utflyging fra bane 15 er det en 180 grader sving i lav høyde mellom noen av disse høye fjellene (figur 2). Flygererfaring tilsier at det kan være intens turbulens, systematisk vindskjær og vertikalvind både i stor og lav høyde. Slik erfaringen indikerer også at vestlige høydevinder oftest gir de mest ugunstige vindforholdene (Johansen 2005).

For å studere i mer detalj hvordan strukturen av lokale strømmer over dette området kan være, er fire hovedtyper av vindeffekter simulert. Dominerende vindretning på flyplassen er fra sørøst, men at denne retningen dominerer skyldes nok delvis lokale effekter fra fjellryggen langs Storhaugen–Beassevarri. Den dominerende høydevinden ligger sannsynligvis i mer sør-søvestlig retning (Harstveit 2005). **Sør-søvestlig høydevind** (200 grader) er derfor valgt som representativ for en relativt vanlig vindretning. Siden vinden da kommer fra store landmasser, antas den å være stratifisert. Dessuten er det gjort simuleringer med nøytralt stratifiserte strømmer fra vindretningene **vest-søvest** (250 grader), **vest-nordvest** (290 grader) og **nordøst** (45 grader). Alle simuleringer er gjennomført med idealisert innløpsprofil for vind og turbulens, med en høydevind på $U=20$ m/s. For nøytrale strømmer vil alle beregningsresultater variere lineært med U , slik at disse beregningene er gyldige for alle U . Ved de to første vindretningene vil bane 15 normalt bli brukt til landing og avgang. Ved de to siste vindretningene vil bane 33 normalt bli brukt til landing og avgang.

2 Simuleringer

2.1 Simuleringsområde

Den lokale vinden over Sørkjosen kan være avhengig av fjellterreng som ligger langt oppstrøms, og det er derfor nødvendig med et stort beregningsområde. Figur 1 viser kartutsnitt over det regionale området som er brukt. Området har en størrelse på $L_x = 35$ km, $L_y = 35$ km i hhv. østlig og nordlig retning, og en maksimal høyde på 3.8 km. Overflateruheten estimeres som $z_0 = 0.001$ m over sjø og $z_0 = 0.3$ m over land.

Beregningene er gjort på et grid med $151 \times 151 \times 41 = 934\ 841$ nodepunkter. Dette gir en oppløsning i de sentrale områdene på $\Delta x \approx 200$ m, og en minste vertikaloppløsning på $\Delta z_{min} \approx 2$ m nær bakken. Dette er antakelig for sparsomt til at viktige småskala variasjoner kan representeres realistisk. Effekter som separasjonsområder og hydrauliske transisjoner vil dermed bli underestimert. Simuleringer av idealiserte strømmer indikerer at oppløsningen burde vært sammenlignbar med $\Delta x \approx 50$ m hvis slike effekter skal estimeres rimelig nøyaktig (Eidsvik 2006). Den grovere oppløsningen antas imidlertid detaljert nok til å gi grove estimater av strømmen over bratte fjell.

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 idealiserte innløpsprofil

for vind modelleres her som et nøytralt sjiktet likevektsprofil, og kan skrives på formen (Panofsky and Dutton 1985, Kaimal and Finnigan 1994):

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \frac{z}{z_0} + W\left(\frac{z}{D}\right) \right) \quad (1)$$

Her representerer u_* friksjonshastigheten, underlagets ruhet er z_0 , høyden over bakken er z og tykkelsen av grenseskiktet er gitt som $D \approx 0.2u_*/f = O(1km)$. Den såkalte wake-funksjonen er definert v.h.a. formelen $W(z/D) = (A-1)(z/D) - A/2(z/D)^2$, hvor konstanten $A \approx 4.0$.

Atmosfæriske strømmer i fjellterreng er sterkt avhengig av om luft som passerer over et fjell blir tyngre eller lettere enn sine omgivelser. Er den lettere, vil den fortsette å stige, og konvektive skyer kan bli utviklet. Er den tyngre, vil den falle tilbake og tyngdebølger kan bli utviklet. Disse forholdene avgjøres av den vertikale fordelingen av potensiell temperatur (θ). Når $\partial\theta/\partial z < 0$ gir det termisk ustabilitet. Når $\partial\theta/\partial z > 0$, er stratifikasjonen positiv, med termisk stabilitet. I simuleringene er innløpsprofilen for potensiell temperatur idealisert. Ved toppen av det turbulente grensesjiktet ($z = D$) kan det typisk være et sprang i potensiell temperatur. Over grenseskiktet, for $z > D$, antas en konstant oppdrifts-frekvens, som er definert ved:

$$N = \left(\frac{g}{\theta} \frac{\partial\theta}{\partial z} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Typiske verdier er av størrelsesorden $N = O(0.01s^{-1})$.

I simuleringene er følgende verdier benyttet for innløpsprofilene: For vindhastigheten benyttes ligning (1) ovenfor, med verdiene $(U, D, z_0) = (20 \text{ m/s}, 1000 \text{ m}, 0.3 \text{ m})$. I tilfellet med stratifisert strømning er det valgt et innløpsprofil for potensiell temperatur med $\Delta\theta/\theta \approx 0.06$, og $N \approx 0.01s^{-1}$.

2.3 Vind fra sør-sørvestlig retning (200 grader)

I dette tilfellet kommer vinden fra store landmasser, og antas derfor vanligvis å være stratifisert. Et viktig aspekt ved stratifisert strømning over fjellterreng er mulighetene for at det kan oppstå fjellbølger (le-bølger). For å vurdere dette trenger vi å tallfeste noen viktige størrelser: Fasehastigheten for indre bølger langs tetthetsspranget kan beregnes som $c = \sqrt{(\Delta\theta/\theta)gD}$. Froude-tallet er gitt som forholdet mellom fasehastighet og fristrømningshastighet, og blir i vårt tilfelle

$$F = \frac{U}{c} \approx 0.7$$

En annen viktig parameter er forholdet mellom inversjonshøyden og vertikal bølgelengde av fjellbølger, noe som i dette tilfellet kan estimeres til

$$\frac{DN}{U} \approx 0.5$$

Ifølge Vosper (2004) viser beregninger at betydelige fjell-bølger kan opptre når følgende relasjoner gjelder:

$$\left(\frac{U}{c} \right)^2 < \frac{\tanh(ND/U)}{ND/U} \sim 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{DN}{U} \right)^2 < 1$$

Disse betingelsene er oppfylt for den aktuelle simuleringen med stratifisert strømming, og det skulle derfor være gode grunner til å vente fjell-bølger med betydelige amplituder.

Resultater fra denne simuleringen er vist på figurene 3, 4, 5, 6. Det er tydelig at det blir induert le-bølger, men de har vesentlig mindre amplituder og turbulensintensitet enn estimert for lignende strømming over Kvaløya/Hammerfest (Eidsvik og Utnes 2006) og fra idealiserte modeller (Vosper 2004). Både stratifikasjon og gridoppløsning er nokså lik simuleringen for Hammerfest, og forklaringen på den markerte forskjellen i resultater kan derfor ha noe å gjøre med forskjellen i selve terreng-strukturen for de to områdene. Det virker som om de lavere delene av grenseskiktet i stor grad blir dekket fra strømmen over fjellene og ikke blir involvert i bølgebevegelser (figur 4). Strukturen av fjellformasjonene ser dermed ut til å virke dempende på bølger som blir induert oppstrøms. For strømmen i høyden betyr dette at bare de tre-dimensjonale fjelltoppene blir "sett". Disse spekulasjonene er konsistent med at maksimal turbulensintensitet, omkring $\sqrt{K}/U \approx 0.17$, ligger så høyt som i ca 800 m høyde, der fjelltoppene også befinner seg (figur 3, 5, 6). Figurene illustrerer også at maksimalnivået av turbulens er lokalisert bak fjelltoppene (figur 6). Gridoppløsningen er relativt grovmasket for mer småskala terreng, og det er derfor sannsynlig at maksimal turbulensintensitet her kan være underestimert (Eidsvik 2006).

Vindforholdene langs innflyging til Sørkjosen er illustrert i figurene 5, 6. Her er maksimal turbulens lokalisert mellom ca 360 m og 720 m, og den er bare ca $\sqrt{K} \approx 2.5$ m/s, noe som tilsvarer en turbulensintensitet på $\sqrt{K}/U \approx 0.13$ (hvor $U = 20$ m/s). Samtidig som turbulensintensiteten minker ved ca 300 m høyde, er det også et systematisk midlere vindskjær (figur 6). Beregningene indikerer at innflygningsflyforholdene under ca 300 m er uproblematisk. Det samme ser ut til å være tilfelle for utflyging fra bane 15 (figur 6).

Forholdene ved stratifisert strømming kan bli vesentlig forskjellig dersom innløpsprofilene for vindhastighet og stratifikasjon endres. Når det er forhold for dannelse av indre bølger, kan det i verste fall oppstå ekstreme forhold som brytende indre bølger, rotorstrømming og hydrauliske transisjoner. Slike effekter kan gi ekstreme vindskjær, vertikalvind og turbulensintensitet. Idealiserte beregninger for slike tilfeller viser at maksimal turbulensintensitet da kan komme helt opp mot $\sqrt{K}/U \approx 0.5$ (Eidsvik and Utnes 1996). Under slike ekstreme forhold ville allerede en høydevind på $U = 7$ m/s gi en turbulens på $\sqrt{K} \approx 3.5$ m/s, noe som betraktes som sterk turbulens for flyging. Men om slike forhold kan oppstå nær flyrutene i dette tilfellet er det ikke mulig å si noe sikkert om.

Simuleringen ovenfor, med vind fra sør-sørvestlig retning, er i tillegg gjennomført for nøytralt sjiktet strømming. Figur 7 illustrerer predikterte vindforhold langs innflyging til Sørkjosen for dette tilfellet. Maksimal turbulensintensitet er omtrent som i figur 6, men de lavere luftlagene er nå koblet mer opp til høydevinden, slik at det både er sterkere vind og turbulens i lav høyde. Turbulensintensiteten er estimert til omkring $\sqrt{K}/U \approx 0.13$ nesten helt inn til bane 15. På grunn av den relativt grove gridoppløsningen i lokale områder må man regne med en underestimert av lokale vindeffekter, slik at tendenser til separasjon og styrken på turbulensintensiteten i virkeligheten kan være noe større (Eidsvik 2006).

2.4 Vind fra vest-sørvestlig retning (250 grader)

For nøytralte strømmer fra vestlig kant kan man vente betydelig separasjon bak den bratte fjellryggen Storhaugen-Sagdalsfjellet-Beassevarri (Baines 1995, Utnes and Eidsvik 1996). Bak separasjonen vil det strekke seg et tynt skjærslag med stor produksjon av tur-

bulens. Resirkulasjonsområdet kan strekke seg flere fjellhøyder bak toppen av fjellryggen. Maksimal turbulensintensitet i le-området vil være helt opp mot $\sqrt{K}/U \approx 0.25$. Med tanke på flyging, hvor en verdi på $\sqrt{K} \approx 3.5$ m/s betraktes som sterk turbulens, betyr dette at en høydevind på $U > 15$ m/s kan gi ekstreme flyforhold i kjernen av et slikt resirkulasjonsområde.

Figurene 8, 9 illustrerer beregningsresultater for denne typen nøytral strømning, med vindretning fra vest-sørvest. Høydevinden blåser omtrent normalt på den bratte fjellkjeden Storhaugen-Sagdalsfjellet-Beassevarri, men beregningene viser bare svake tendenser til separasjon og resirkulasjon (figur 8). I realiteten vil dette resirkulasjonsområdet sannsynligvis være betydelig større. Årsaken til en slik underestimert er som tidligere antydning at oppløsningen er for grovmasket i lokale områder med stor terrengvariasjon. Dette gir to dempende effekter: For det første vil lokale, bratte fjellskråninger i terrenget gattes noe ut i kartdataene. I dette tilfellet viser kartdataene en helningsvinkel i fjellskråningen ned mot flyplassen på omkring 25-30 grader, mens det i virkeligheten sannsynligvis er lokale områder med brattere terreng. Den andre glattende effekten er at modellens gridoppløsning gir relativt få punkter nedover den bratteste delen av fjellsiden, slik at modellen ikke klarer å justere seg helt til omgivelsene. Dette betyr at lokalt vindskjær og produksjonen av turbulens blir underestimert (Eidsvik 2006). Maksimalnivået for turbulensen bak fjelltoppene i området er estimert til ca $\sqrt{K} \approx 3.5$ m/s (figur 9), noe som tilsvarer $\sqrt{K}/U \approx 0.18$. I tilsvarende, men forenklete modelleksperimenter vil denne verdien ligge i området 0.20 - 0.25, altså en faktor på 1.1 - 1.4 høyere.

Forholdene langs innflygingen til bane 15 er karakterisert av le-områder bak flere fjell (figur 9). Turbulens langs denne banen, fra ca 900 m og ned til landing, er estimert til maksimalt opp mot $\sqrt{K} \approx 3.0$ m/s, og ligger sannsynligvis noe høyere i virkeligheten pga grideffekter. Men det er verdt å merke at flyruten unngår de aller sterkeste turbulensområdene i le-områdene (opp mot $\sqrt{K} \approx 3.5$ m/s).

Relatert til flyging betyr dette følgende: Med en antatt øvre turbulensverdi på $\sqrt{K} \approx 3.5$ m/s for hva som er akseptabelt for flyging, viser disse beregningene at forholdene langs innflygingsbane 15 kan gi uakseptable forhold hvis høydevinden blir sterkere enn omkring 16 m/s. Da har vi justert opp beregningene med den høyeste korreksjonsfaktoren ovenfor (dvs. 1.4), altså et konservativt estimat.

2.5 Vind fra vest-nordvestlig retning (290 grader)

Figurene 10, 11, 12 illustrerer beregningsresultater for nøytral strømning med vind fra vest-nordvestlig retning. Innflyging til bane 33 er karakterisert av en maksimal turbulens på opp mot $\sqrt{K} \approx 2.5$ m/s, dvs. $\sqrt{K}/U \approx 0.13$, fra omkring 730 m og ned mot bakken (figur 12). Denne strømningen har ingen separasjon i det aktuelle området, og dette estimatet er dermed sannsynligvis relativt realistisk. Dette tilfellet gir derfor mer gunstige flyforhold enn tilfellet ovenfor.

2.6 Vind fra nordøstlig retning (45 grader)

Figurene 13, 14, 15 illustrerer beregningsresultater for nøytral strømning med vind fra nord-østlig retning. Bakkevinden viser tre-dimensjonal strømning med antydning til resirkulasjonsområder bak noen av de bratteste fjellpartiene. Relativt små resirkulasjon-

sområder kan være vanskelig å lokalisere på denne typen horisontalplott, og sees lettere i vertikalsnitt. For eksempel sees ingen tydelig resirkulasjon bak de bratte fjellveggene sørvest for flyplassen fra figur 13, mens et vertikalsnitt viser en tre-dimensjonal resirkulasjon i lokale deler av dette området. Bak Nordkjosfjellet kan man se et resirkulasjonsområde fra bakkevinden på figur 13. Oppløsningen på kartdataene gir en typisk helningsvinkel for disse fjellsidene på i underkant av 30 grader, og prediksjonen ser ut til å være relativt konsistent med dette. Men pga gridoppløsningen må man likevel anta en noe svakere resirkulasjon og turbulensintensitet enn i virkeligheten.

Maksimal turbulens er beregnet til omkring $\sqrt{K} \approx 3.5$ m/s, dvs. en turbulensintensitet på $\sqrt{K}/U \approx 0.18$, og som tidligere nevnt er dette sannsynligvis et underestimat for en verdi i området 0.20 - 0.25.

Forholdene for innflygingen til bane 33 er karakterisert av le-området bak Nordkjosfjellet, og i dette området er det betydelig vindskjær og turbulens (figur 13, 14, 15). Maksimal turbulensintensitet i ca 300 m er estimert til $\sqrt{K}/U \approx 0.18$, dvs. i området 0.20 - 0.25 hvis vi antar samme oppjusteringer som tidligere. Nedover mot bakkenivå reduseres turbulensintensiteten betydelig.

Dersom høydevinden dreies omkring 20 grader mot nord, vil dette flytte le-området bak Nordkjosfjellet til kort base og finale bane 33.

3 Diskusjon

Denne rapporten inneholder beregninger av lokale vindeffekter i området rundt Sørkjosen lufthavn. Det er gjort beregninger for 4 forskjellige hovedvindretninger, nemlig vind fra sør-sørvest, vest-sørvest, vest-nordvest og nordøst. For sør-sørvestlig vind er det gjennomført beregninger både med positiv og nøytral stratifikasjon, mens det bare er gjort beregninger med nøytral stratifikasjon for de øvrige vindretningene. I alle tilfeller er det antatt forenklede innløpsbetingelser ved bruk av standard-profiler for vindhastighet, turbulens og potensiell temperatur.

På grunn av det kompliserte terrenget er det valgt et relativt stort geografisk område for beregningene. Dette fører til at gridoppløsningen blir relativt grovmasket med tanke på enkelte lokale terrengvariasjoner. Det er likevel grunn til å anta at fjellbølger er representert relativt godt med denne oppløsningen. De største unøyaktighetene gjelder endel småskalige effekter som kan bli glattet ut eller dårlig representert. Dette har betydning for effekter som lokal separasjon og resirkulasjon, og beregningene kan dermed også gi en tendens til underestimering av turbulensintensiteten i slike områder. I tillegg er det sannsynlig at kartdataene (100 x 100 m) vil glatte ut bratte, lokale fjellskråninger. For eksempel gir kartdataene en typisk helningsvinkel på omkring 30 grader i fjellskråningene sørvest for flyplassen, mens inntrykket er at disse skråningene ofte er brattere. Med disse begrensningene i minne er det likevel grunn til å anta at resultatene er rimelige når det gjelder effekter på noe større skala. Det er dessuten mulig å anta rasjonelle oppskaleringer av resultater for å gi konservative estimater.

En kort oppsummering av de enkelte beregningstilfellene relatert til flyging er som følger: Tilfellet med stratifisert sør-sørvestlig vind gir en maksimal turbulens langs innflygingsruten på omkring $\sqrt{K} \approx 2.5$ m/s, lokalisert i en høyde mellom 720 m og 360 m, og uproblematisk forhold under 300 m. Samme vindretning uten stratifikasjonseffekt gir

omtrent samme turbulensintensitet som tilfellet ovenfor, men nå er det sterkere turbulens i lav høyde, med $\sqrt{K} \approx 2.5$ m/s helt inn til bane 15.

Tilfellet vest-sørvestlig vind gir en maksimal turbulens langs innflyging til bane 33 beregnet på omkring $\sqrt{K} \approx 3.0$ m/s, mens en vest-nordvestlig høydevind gir en maksimal turbulens på ca $\sqrt{K} \approx 2.5$ m/s langs innflygingen.

Tilfellet nord-østlig vind gir en maksimal turbulens på helt opp mot $\sqrt{K} \approx 3.5$ m/s langs innflygingsruten. Dette er det tilfellet som gir sterkest turbulens langs flyruten.

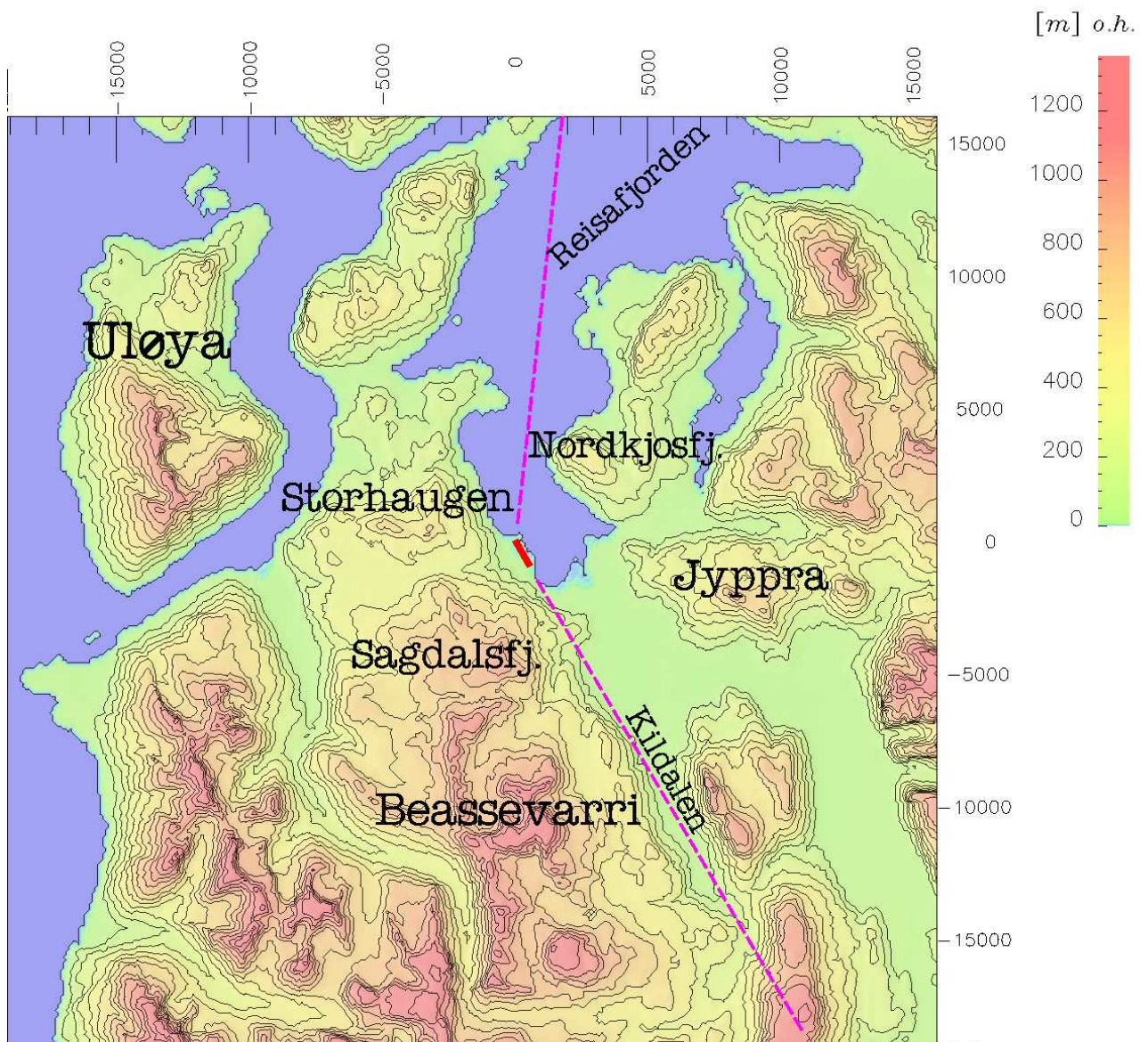
Som tidligere diskutert kan det tenkes at turbulens-estimatene ligger noe for lavt i visse tilfeller. Ved å relatere turbulensintensiteten til forenklete, kjente resultater, har vi tidligere indikert en mulig oppjustering av verdiene med en faktor på mellom 1.1 - 1.4. Hvis vi bruker den mest konservative justeringen, og antar en øvre grense for forsvarlig flyging på $\sqrt{K} \approx 3.5$ m/s, vil allerede en høydevind på $U > 15$ m/s kunne gi flybegrensninger.

Når en flyger kjenner høydevindsretningen, er det mulig å bedømme graden av separasjon ved observasjon av sjøoverflaten. Dersom vindrossene og bølgene går i omtrent samme retning som høydevinden over hele fjorden, er det ikke separert strømming i lokalområdet, og turbulensintensiteten er da sannsynligvis moderat ($\sqrt{K}/U < 0.2$). Hvis vindrossene derimot går i motsatt eller svært forskjellige retninger bak fjell, er det tegn på separert strømming, med maksimal turbulensintensitet opp mot $\sqrt{K}/U \approx 0.25$. Da gjelder tilsvarende begrensninger som nevnt ovenfor, nemlig at en høydevind på $U > 15$ m/s kan gi ekstremt vanskelige flyforhold.

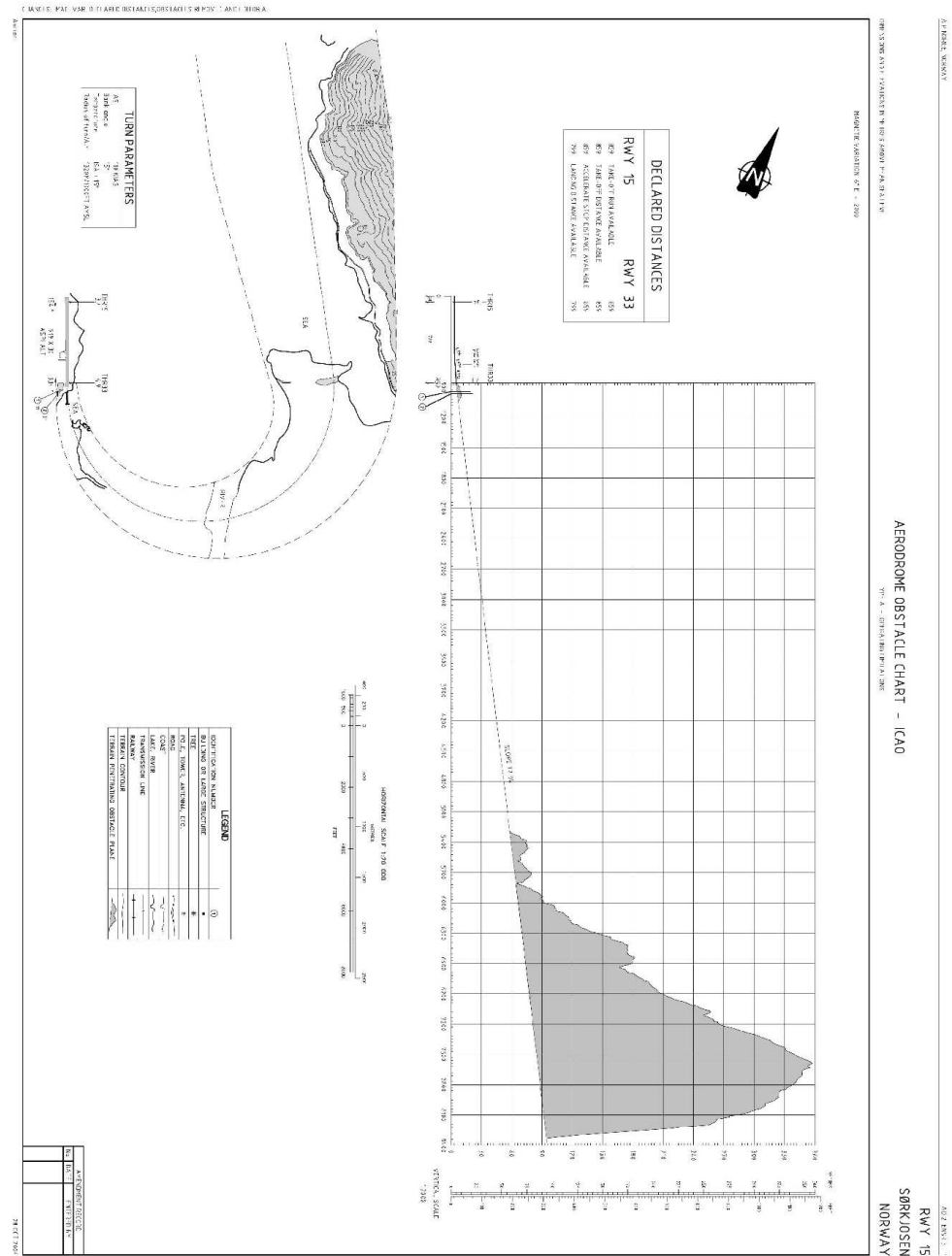
Referanser

- [1] Baines P.G. (1995): Topographic Effects in Stratified Flows. Cambridge Monographs on Mechanics. 1995 482 pp.
- [2] Belcher S.E., Hunt J.C.R. (1998): Turbulent Flow over Hills and waves. Annu.Rev. Fluid. Mech. Vol 38 pp 507-38.
- [3] 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.
- [4] Eidsvik K.J., Utne 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.
- [5] Eidsvik K.J., Holstad A., Lie I., Utne T. (2004): A Prediction System for Local Wind Variations in Mountainous Terrain. Boundary Layer Meteorology Vol 112 pp 557–586.
- [6] 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.
- [7] Eidsvik K.J., Utne T. (2006): Vindvariasjoner over Hammerfest lufthavn basert på estimater for 01-05-2005 kl 14:00. SINTEF rapport
- [8] Eidsvik K.J.(2006): Prediction errors associated with sparse grid estimates of local atmospheric flows. SINTEF manuscript.

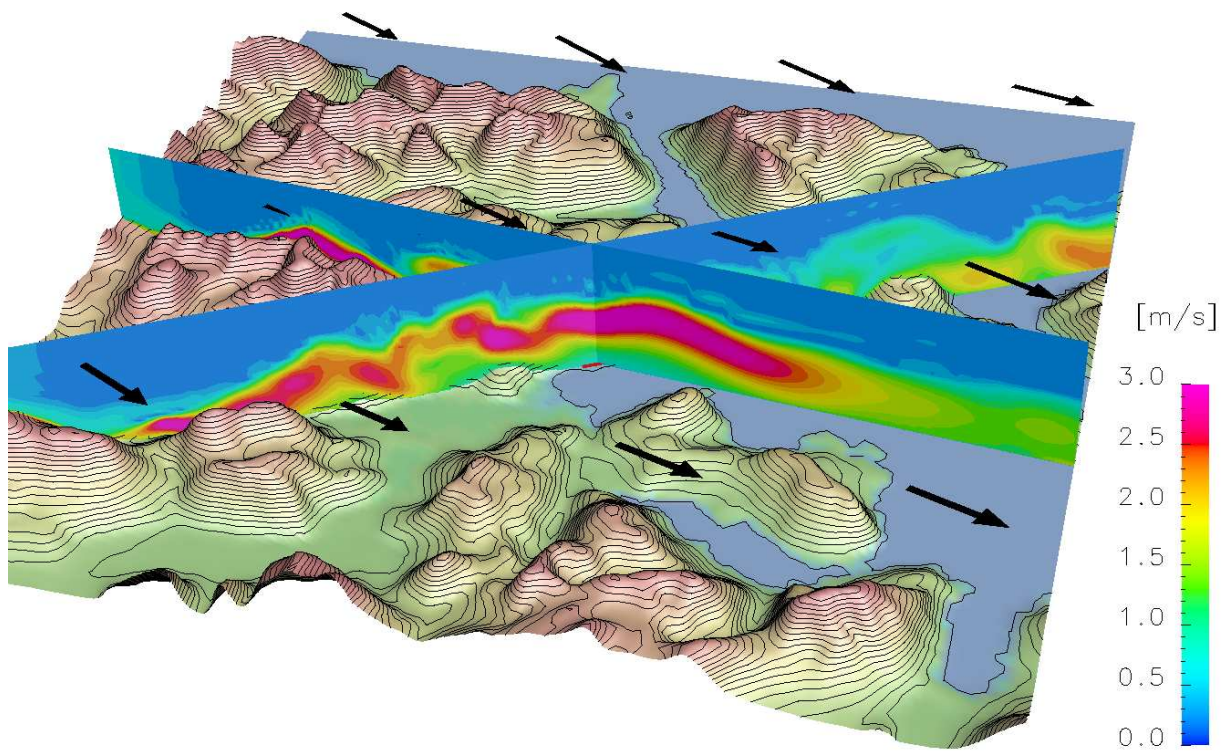
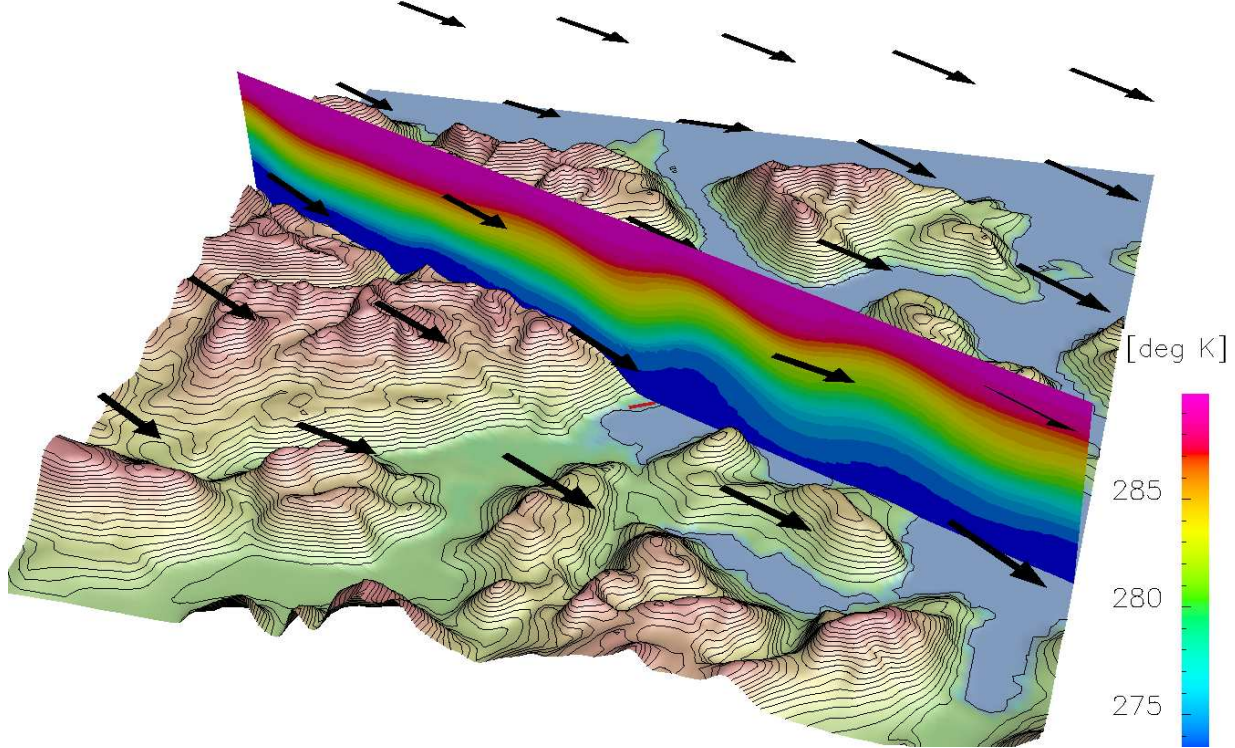
- [9] Johansen B. (2005): Privat kommunikasjon. Widerøe.
- [10] Kaimal J.C., Finnigan J:J (1994): Atmospheric Boundary Layer Flows, Their Structure and Measurement. Oxford University Press 1994.
- [11] Lie I., Utnes T., Blikberg R. (2003). On preconditioned iterative solution of distributed sparse linear systems in SIMRA. <http://balder.ntnu.no/ttp>
- [12] Harstveit K. (2005): Privat kommunikasjon. met.no
- [13] Panofsky H.A.and Dutton J.A. (1985): Atmospheric Turbulence. John Wiley, New York. 397pp.
- [14] Riley and Lelong (2000): Fluid Motions in the presence of strong stable Stratification. Ann. Rev. Fluid Mech. Vol 32 pp 613–657.
- [15] Sheridan P.F., Vosper S.B. (2005): A flow regime diagram for forecasting lee waves, rotors and downslope winds. Manuscript 2005.
- [16] Utnes T. (2002): Numerical formulation of a semi-implicit Reynolds-averaged model (SIMRA). SINTEF Applied Mathematics.
- [17] Utnes T., Eidsvik K.J. (1996): Turbulent flows over mountains modelled by the Reynolds equations. Boundary-Layer Meteorology. Vol 79 pp 393-416.
- [18] Vosper S.B. (2004): Inversion effects on mountain lee waves. Q.J.R. Meteorol. Soc. Vol 130 pp 1723–1748.



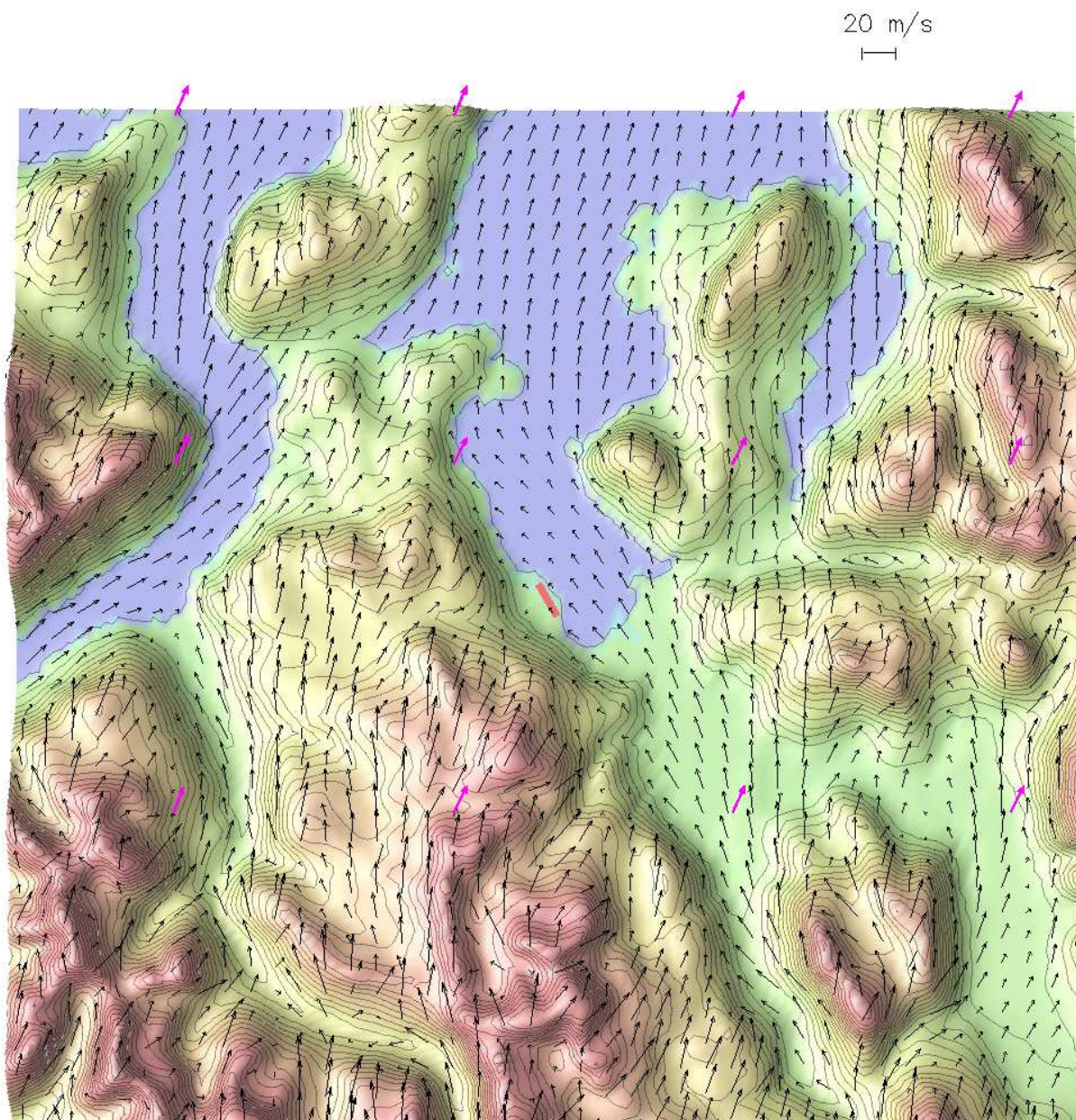
Figur 1: Beregningsområde for simuleringer ved Sørkjosen lufthavn. Koordinatene har hovedretninger mot øst (x-akse) og nord (y-akse). Hele området er (35 x 35) km i utstrekning. Rullebanen ligger i origo og er indikert med rødt. Inn/utflygningsbanen i 367/187 grader er stiplet med rødt; i tillegg er stiplet inn en linje fra rullebanen i retning 330 grader mot Kildalen. Vertikalsnitt er lagt langs disse linjene.



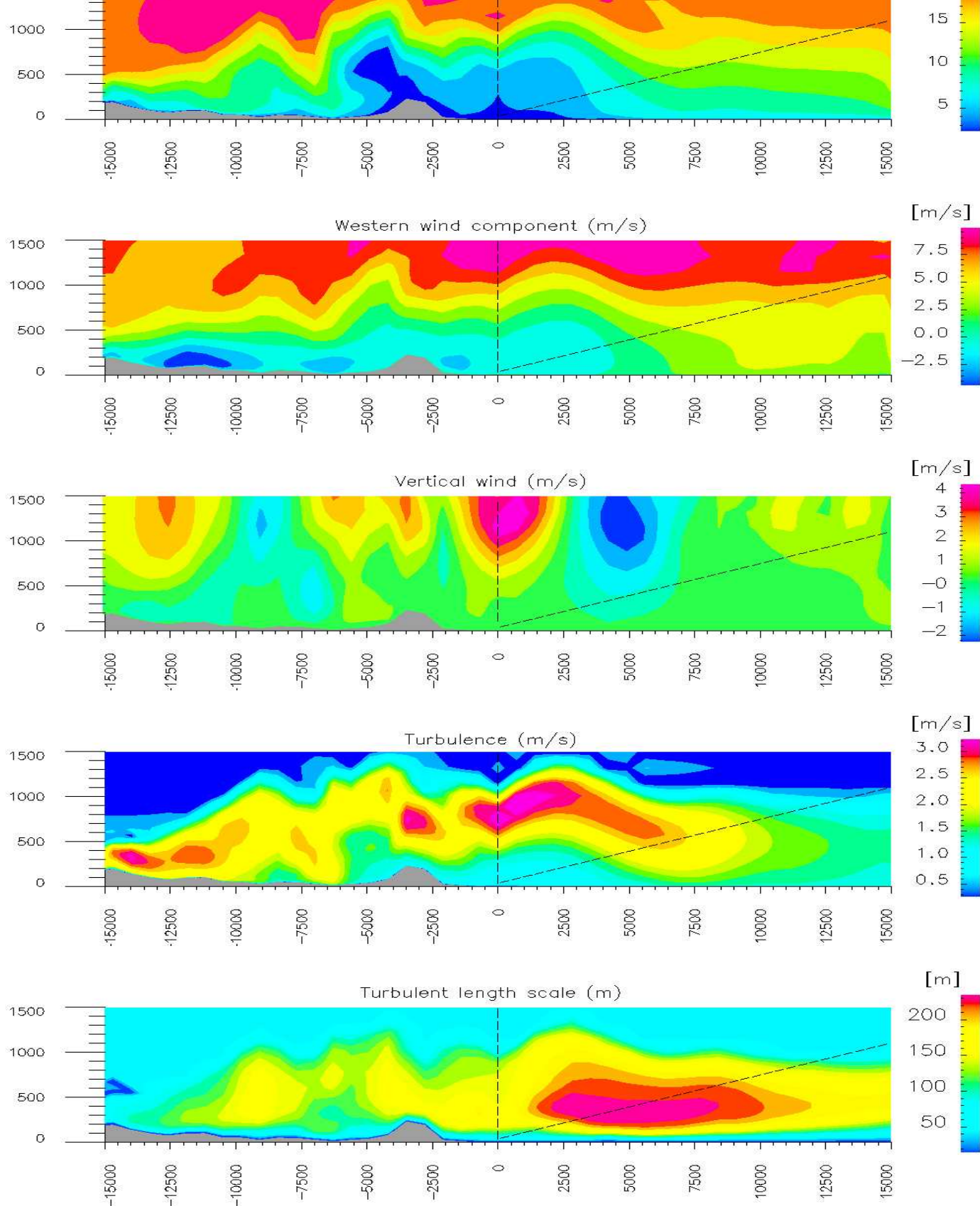
Figur 2: Innflyging mot rullebane 33 og utflyging fra rullebane 15.



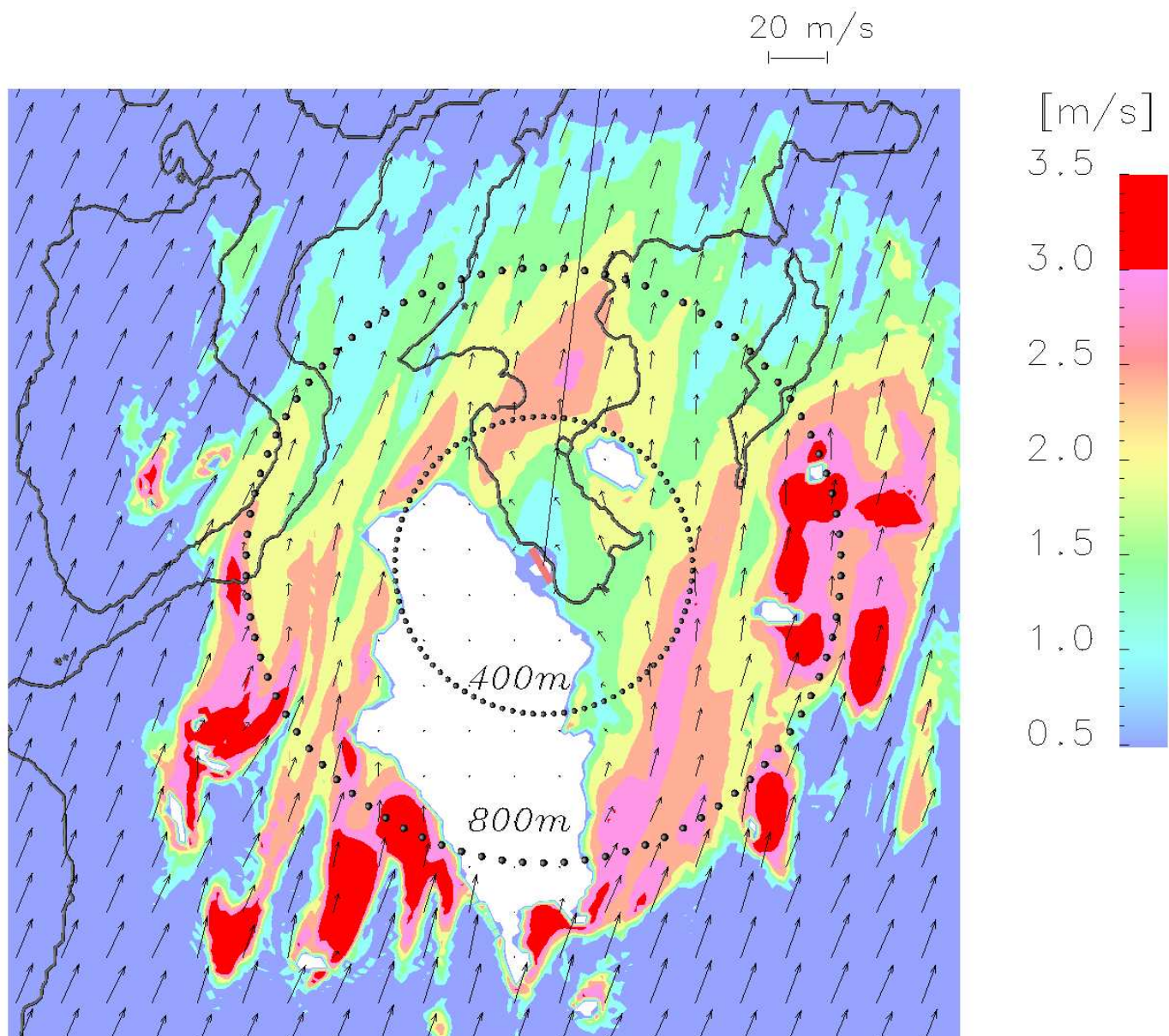
Figur 3: Sør-sørvestlig høydevind (200 grader). Øverst: Potensiell temperatur i vertikalsnitt langs høydevindens retning. Nederst: Turbulens (\sqrt{K}) i vertikalsnitt langs retningene 187/367 grader og 150/330 grader; snitthøyde 2000 m.



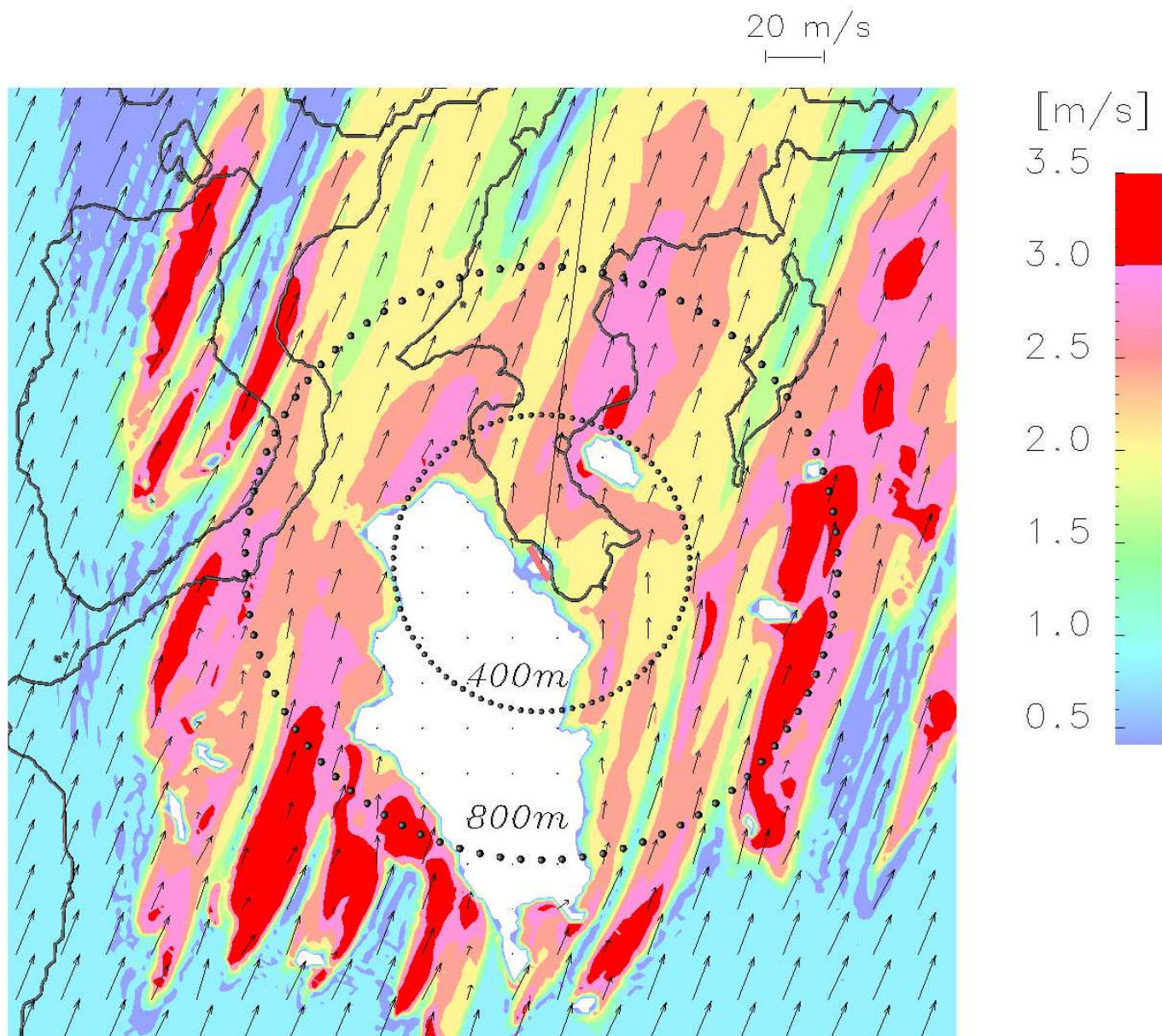
Figur 4: Sør-sørvestlig høydevind (200 grader): Prediktert vindfelt nær bakkenivå (ca. 10 m høyde). Høydevind (2 km) er indikert med røde piler.



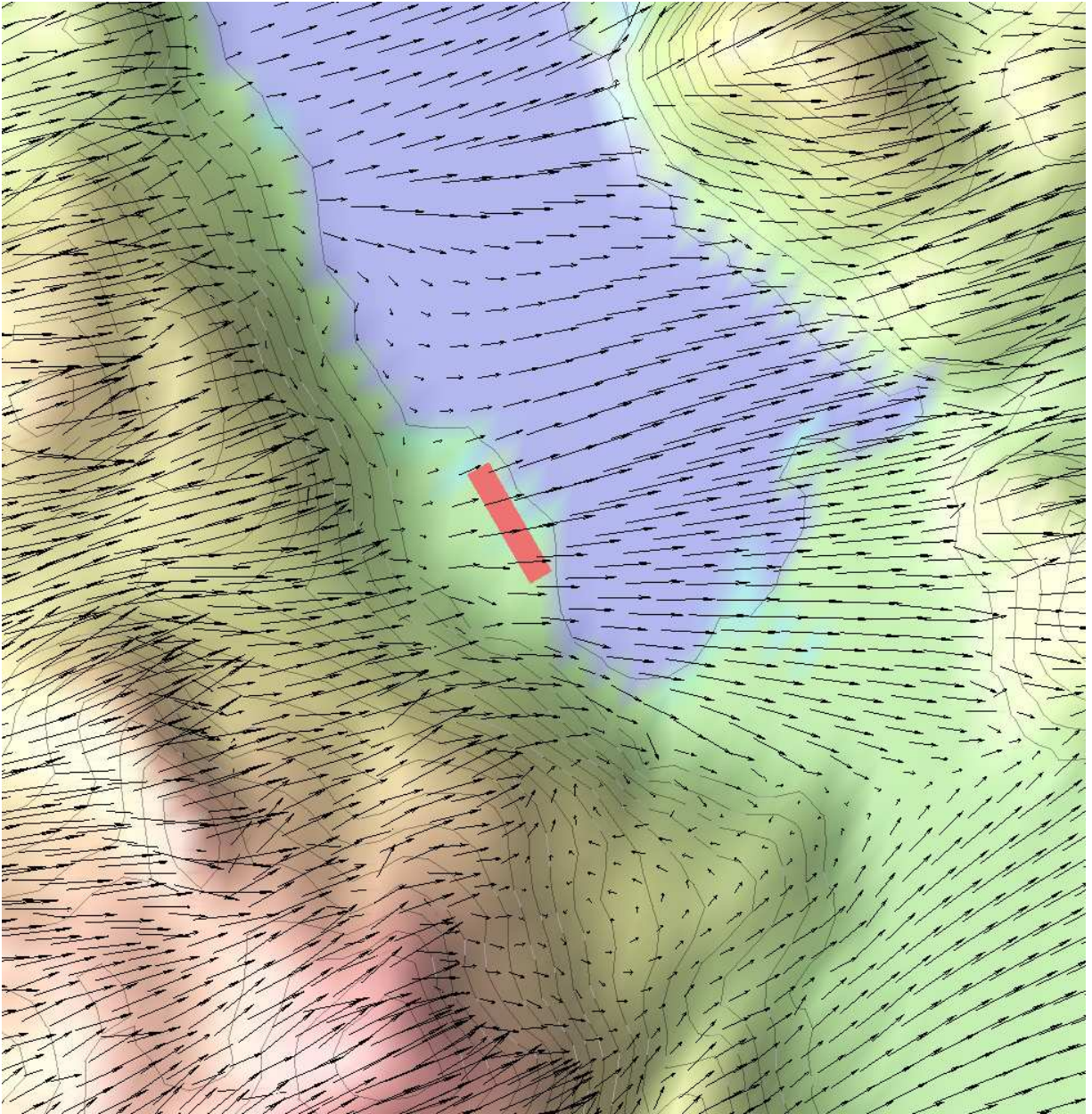
Figur 5: Sør-sørvestlig høydevind (200 grader): Vertikalsnitt langs baner som vist på figur 1; fra sør 150 og grader i retning flyplassen, deretter 187 grader mot Reisafjorden. Origo i koordinatsystemet er plassert omtrent midt på rullebanen. Figurene viser ovenfra og ned: (a) Sørlig vindkomponent; (b) vestlig vindkomponent; (c) vertikalvind; (d) turbulens (\sqrt{K}); (e) turbulent lengdeskala.



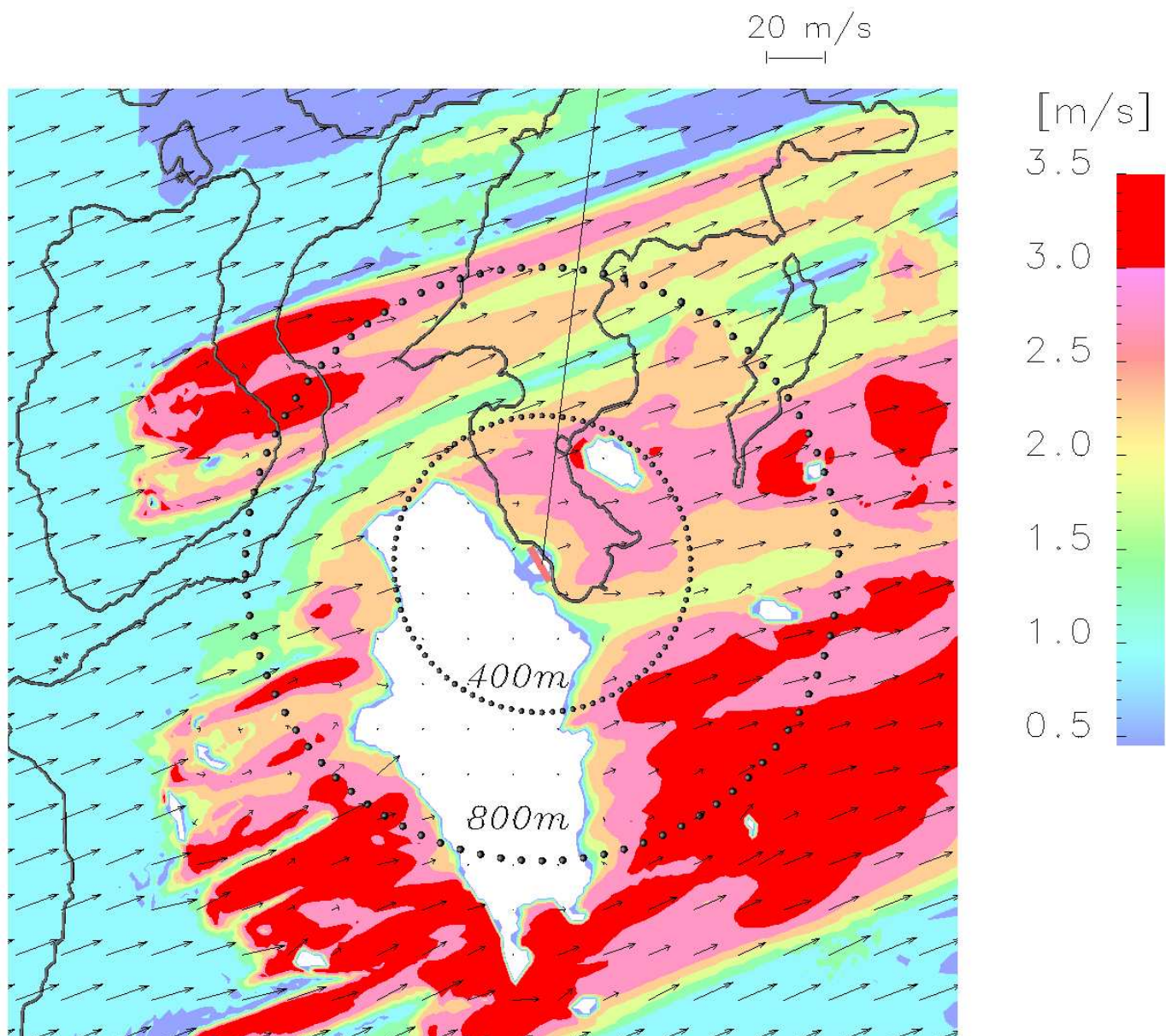
Figur 6: Sør-sørvestlig høydevind (200 grader): Prediktert turbulens og vindfelt i varierende høyder definert av en kjegleflate med 4.5 graders stigningsvinkel og kjegletopp under sentrum av rullebanen. Markerte sirkler i høyder på 400 m og 800 m. Nordlig innflygningsbane (187 grader) er markert.



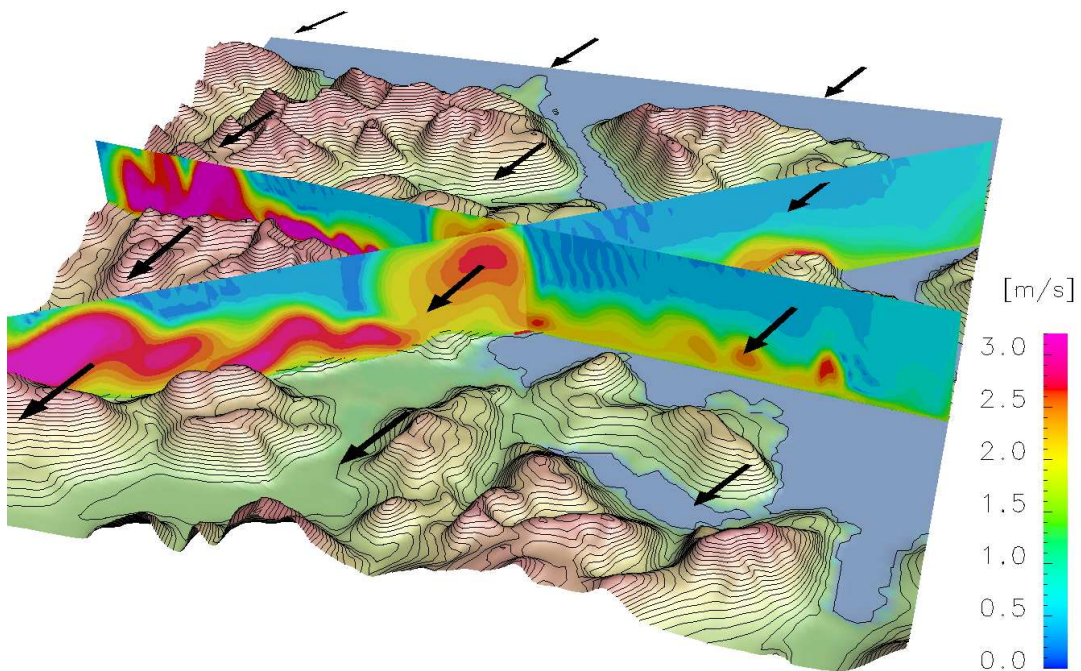
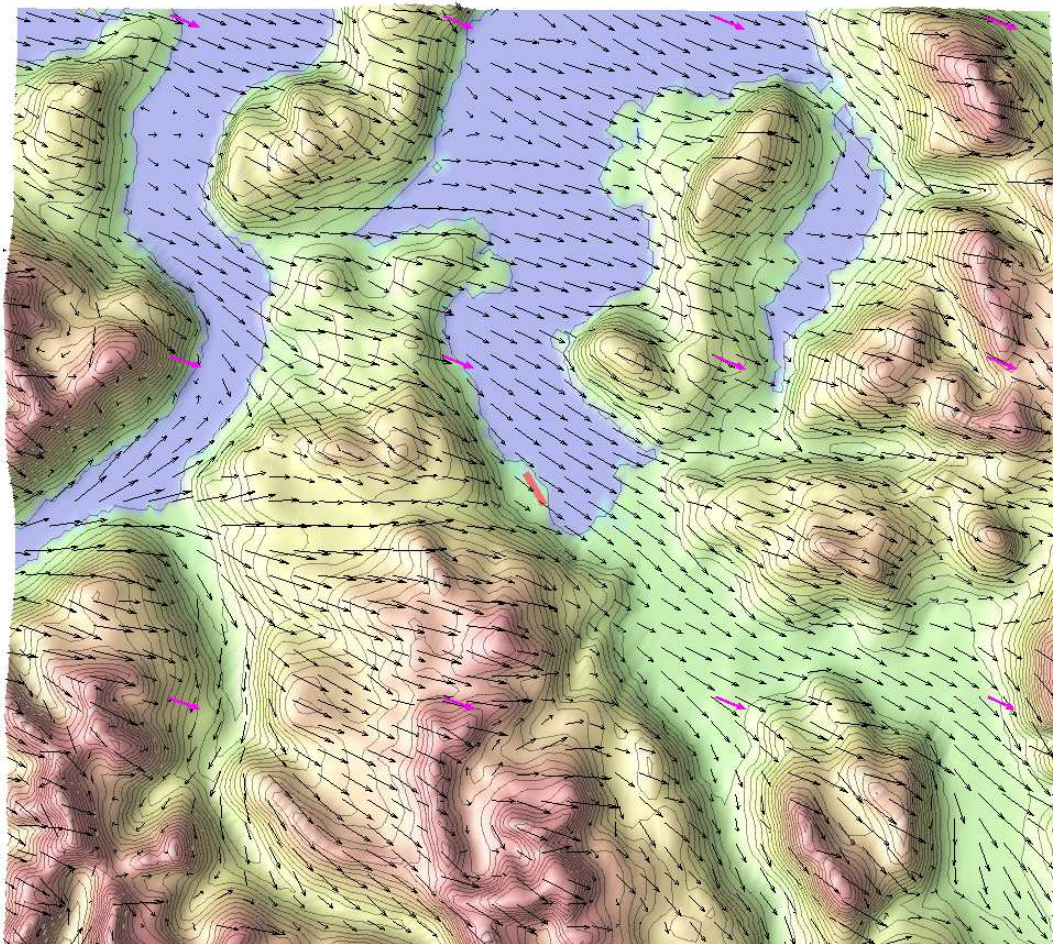
Figur 7: Som i Figur 6, men med nøytral stabilitet



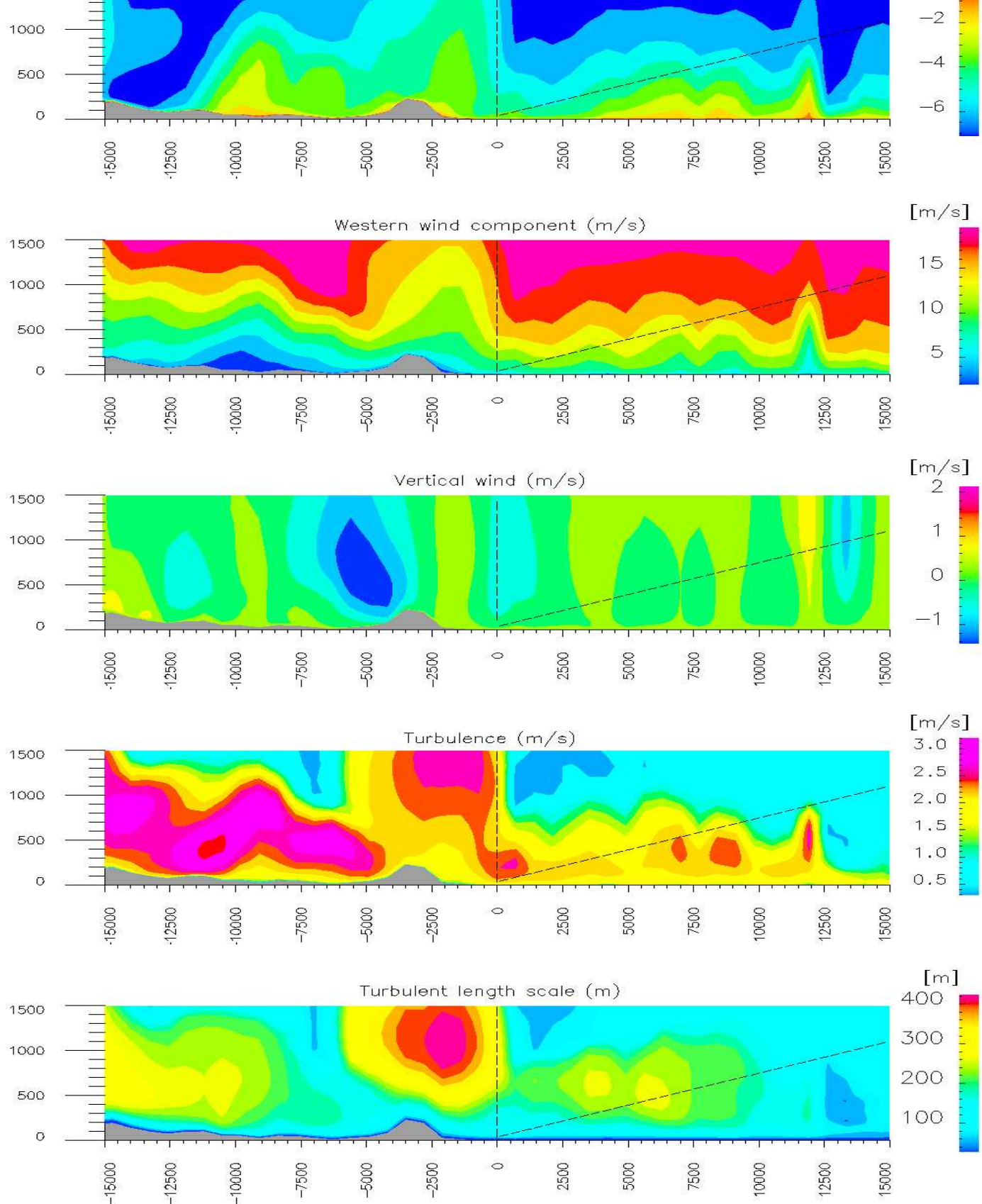
Figur 8: *Vest-sørvestlig høydevind (250 grader), nøytral strømning* : Prediktert vindfelt nær bakkenivå (ca. 10 m høyde).



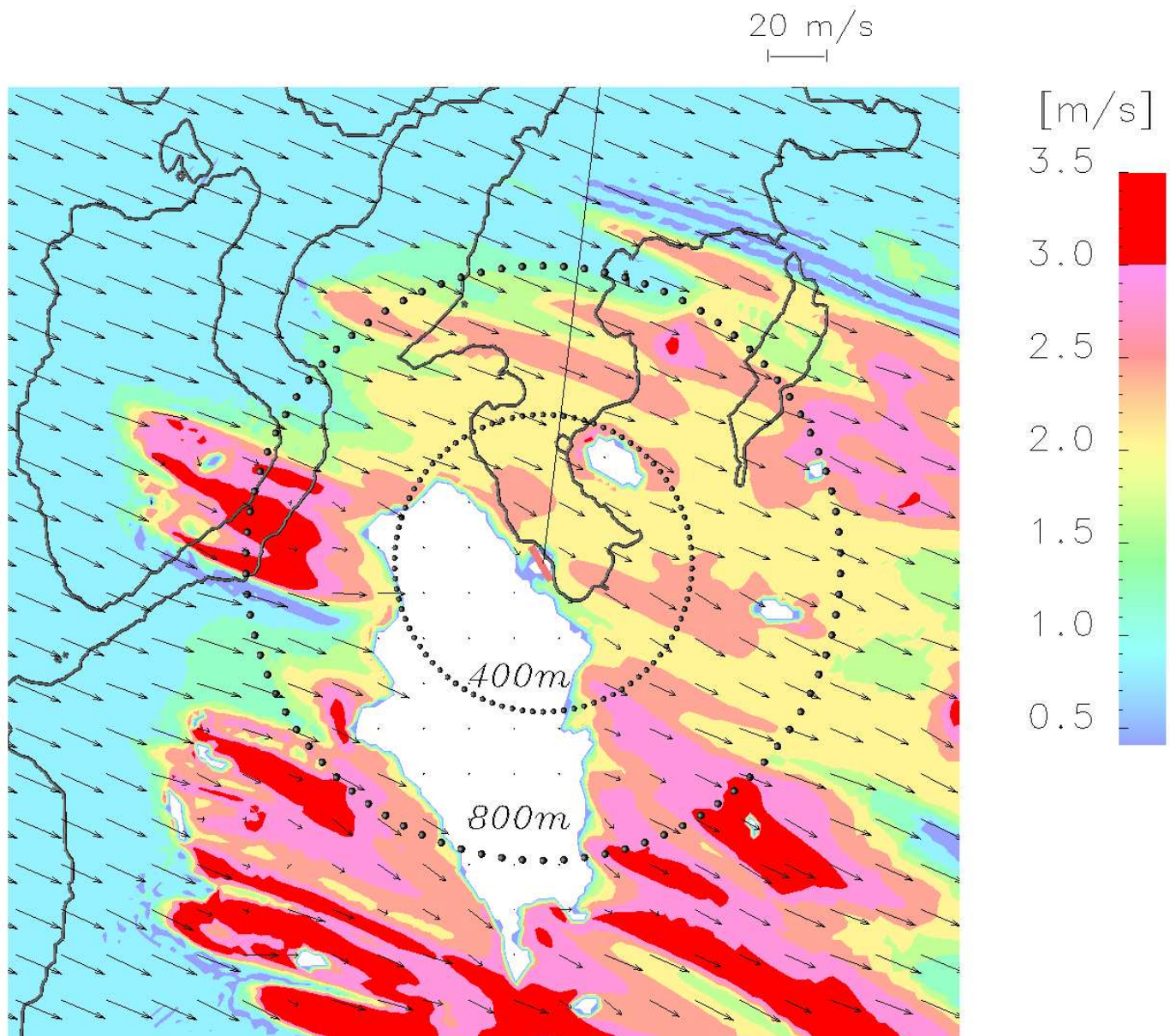
Figur 9: Vest-sørvestlig høydevind (250 grader), n øytral strømning.: Prediktert turbulens og vindfelt i varierende høyder definert av en kjegleflate med 4.5 graders stigningsvinkel og kjegletopp under sentrum av rullebanen. Markerte sirkler i høyder på 400 m og 800 m. Nordlig innflygningsbane (187 grader) er markert.



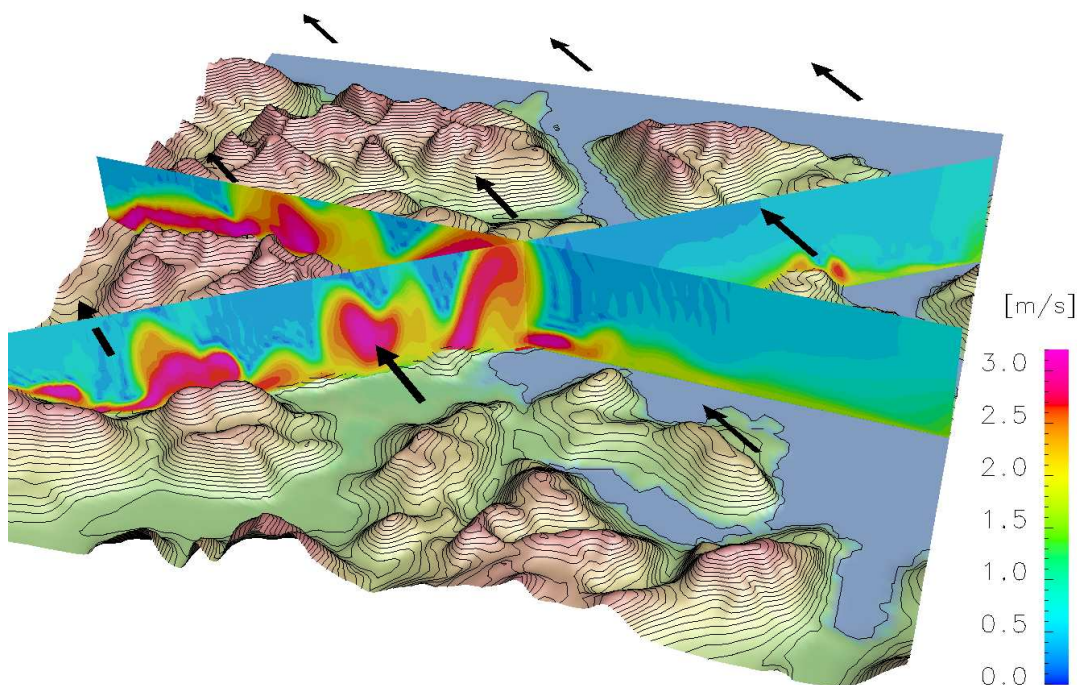
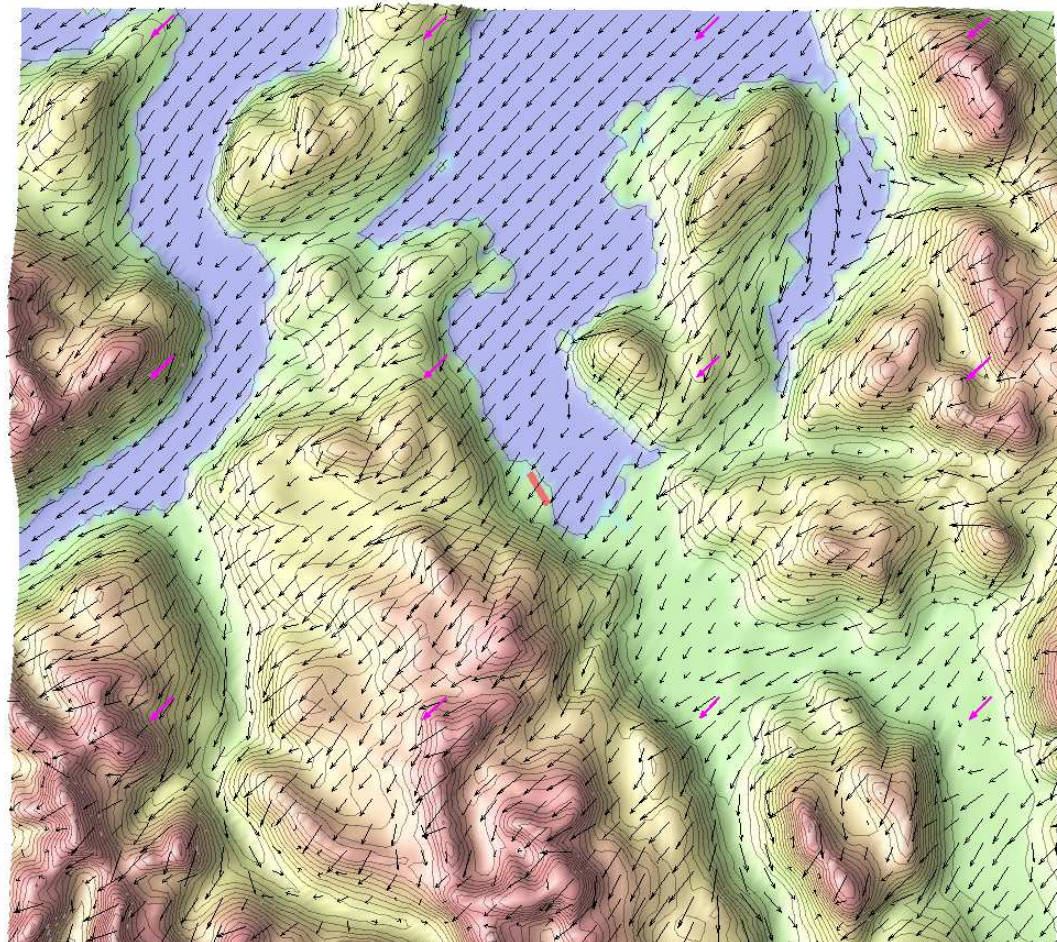
Figur 10: Vest-nordvestlig høydevind (290 grader). Øverst: Prediktert vindfelt nær bakkenivå. Høydevind (2 km) er indikert med røde piler. Nederst: Turbulens (\sqrt{K}) i vertikalsnitt langs retningene 187/367 grader og 150/330 grader; snitthøyde 2000 m.



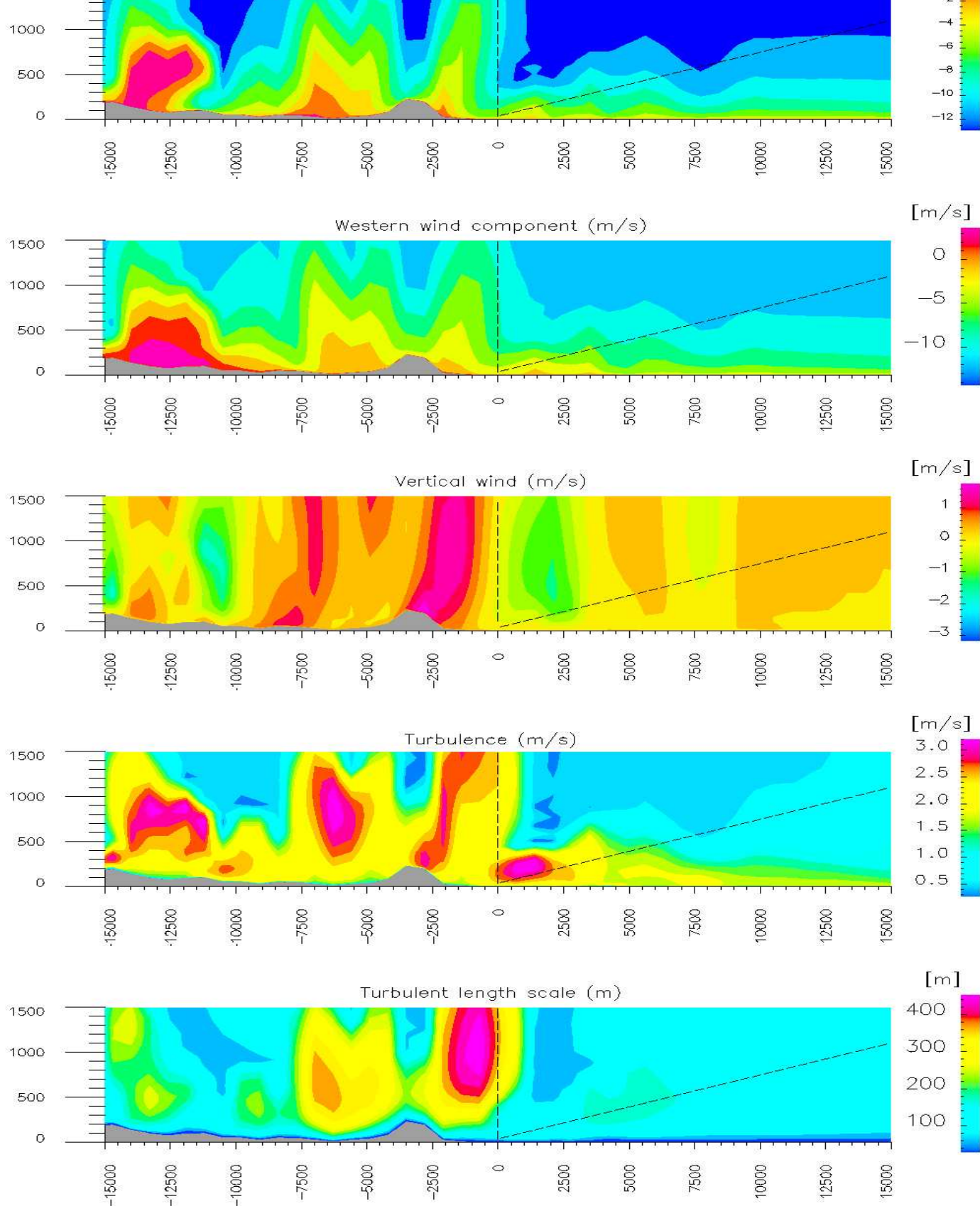
Figur 11: Vest-nordvestlig høydevind (290 grader). Vertikalsnitt langs baner som vist på figur 1; fra sør og 150 grader i retning flyplassen, deretter 187 grader mot Reisafjorden. Origo i koordinatsystemet er plassert omtrent midt på rullebanen. Figurene viser ovenfra og ned: (a) Sørlig vindkomponent; (b) vestlig vindkomponent; (c) vertikalvind; (d) turbulens (\sqrt{K}); (e) turbulent lengdeskala.



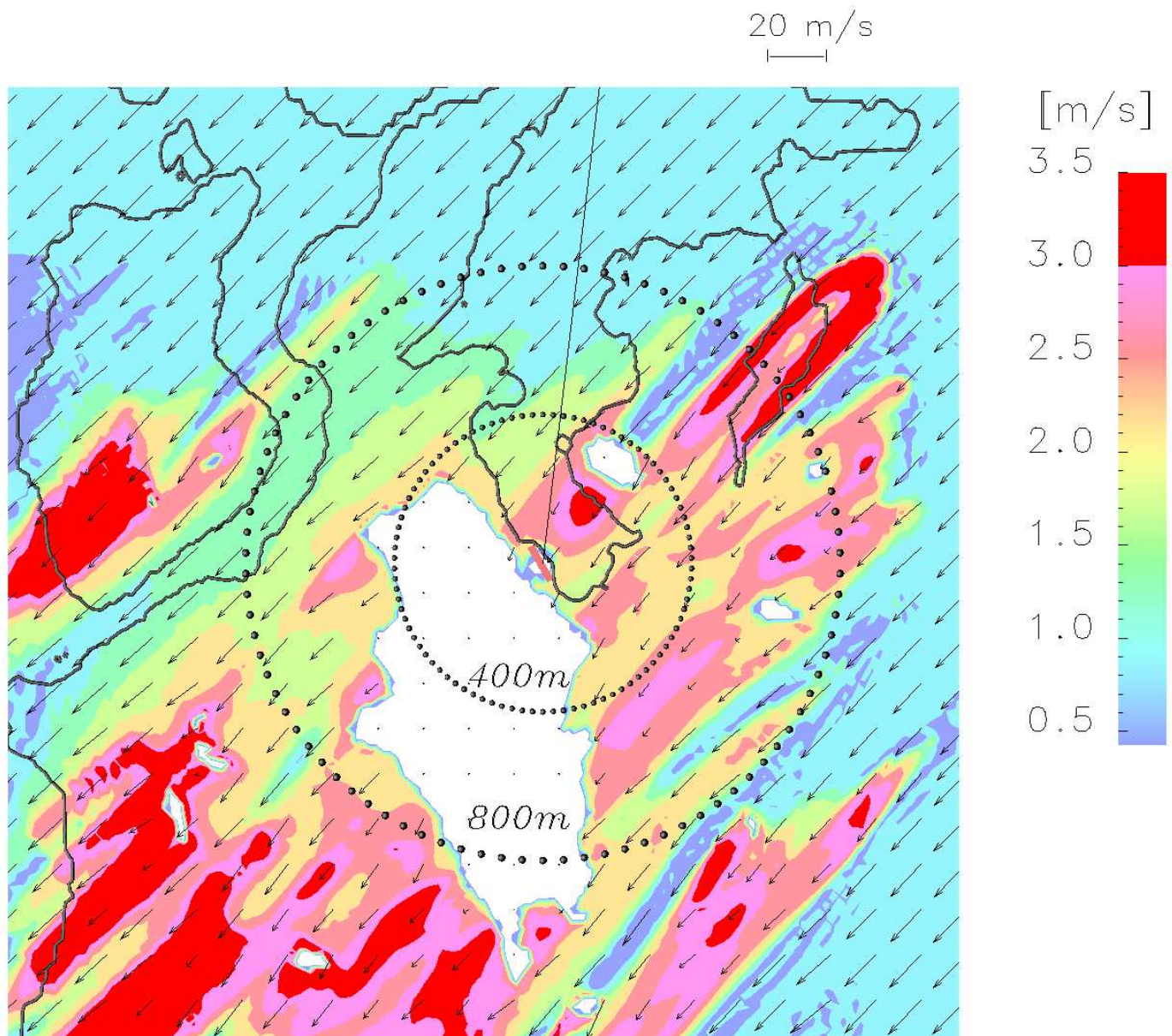
Figur 12: Vest-nordvestlig høydevind (290 grader): Prediktert turbulens og vindfelt i varierende høyder definert av en kjegleflate med 4.5 graders stigningsvinkel og kjegletopp under sentrum av rullebanen. Markerte sirkler i høyder på 400 m og 800 m. Nordlig innflygningsbane (187 grader) er markert.



Figur 13: *Nord-østlig høydevind (45 grader)*. Øverst: Prediktert vindfelt nær bakkenivå. Høydevind (2 km) er indikert med røde piler. Nederst: Turbulens (\sqrt{K}) i vertikalsnitt langs retningene 187/367 grader og 150/330 grader; snitthøyde 2000 m.



Figur 14: Nord-østlig høydevind (45 grader). Vertikalsnitt langs baner som vist på figur 1; fra sør og 150 grader i retning flyplassen, deretter 187 grader mot Reisafjorden. Origo i koordinatsystemet er plassert omtrent midt på rullebanen. Figurene viser ovenfra og ned: (a) Sørlig vindkomponent; (b) vestlig vindkomponent; (c) vertikalvind; (d) turbulens (\sqrt{K}); (e) turbulent lengdeskala.



Figur 15: *Nord-østlig høydevind (45 grader)*: Predikert turbulens og vindfelt i varierende høyder definert av en kjegleflate med 4.5 graders stigningsvinkel og kjegletopp under sentrum av rullebanen. Markerte sirkler i høyder på 400 m og 800 m. Nordlig innflygningsbane (187 grader) er markert.