

# Analiza zavjetrinskih oluja u Skandinavskom gorju na temelju regionalnog klimatskog modela kilometarske rezolucije

---

Jureša, Patrik

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:158988>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Patrik Jureša

ANALIZA ZAVJETRINSKIH OLUJA U  
SKANDINAVSKOM GORJU NA  
TEMELJU REGIONALNOG  
KLIMATSKOG MODELA  
KILOMETARSKJE REZOLUCIJE

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA  
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Patrik Jureša

Diplomski rad

**Analiza zavjetrinskih oluja u Skandinavskom  
gorju na temelju regionalnog klimatskog  
modela kilometarske rezolucije**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Danijel Belušić

Zagreb, 2022.

Zahvaljujem SMHI-ju na pristupu podacima iz projekta NorCP te dopuštenju da koristim njihovo računalo za izradu ovoga rada.

Veliko hvala prof. Belušiću na pruženoj prilici za rad na ovoj temi, prenesenom znanju i prije svega posvećenosti mentoriranju. Uz Vas je istraživanje i pisanje ovoga rada bilo lakše.

Vrlo sam sretan što imam prijatelje uz koje je studiranje bilo manje stresno, uvijek zabavno i nezaboravno. Hvala vam svima na tome!

Najveće hvala cijeloj obitelji, bakama i djedovima, a posebno roditeljima i bratu na razumijevanju, motivaciji i zajedničkom proživljavanju svih trenutaka studija.

## Sažetak

Zavjetrinska oluja mezoskalni je meteorološki fenomen koji se javlja u planinskim predjelima. Vjetar je to čije srednje satne brzine mogu premašiti  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a udari i  $50 - 70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zavjetrinska oluja može pospješiti lokalno nagle promjene u temperaturi i drugim meteorološkim parametrima, ali i nepovoljno djelovati na okoliš i ljude.

U ovom radu razmatrani su podaci dobiveni provedbom projekta NorCP koristeći model HCLIM38-AROME koji je bio ugniježđen u mrežu modela HCLIM38-ALADIN. Rubni uvjeti uzeti su iz ERA-Interim reanalize. Simulacije su pokrile 20 godina, 1998. – 2017., za područje Skandinavskog poluotoka, odnosno Skandinavskog gorja. Skandinavsko gorje vrlo je izazovno za modeliranje i proučavanje njegovog utjecaja na vrijeme zbog izrazite kompleksnosti. Okruženost oceanom i morima, strme planine s mnogo ispresijecanih klanaca, fjordova i vrhova utječu na strujanje te ga mijenjaju i dinamički i termodinamički.

U ovom radu istraživana je povezanost sinoptičke situacije i zavjetrinskih oluja na četiri naknadno podijeljene poddomene. Kako bi se pravilnost mogla uočiti, uvedeno je 10 prije konstruiranih cirkulacijskih tipova. Nakon analize broja zavjetrinskih oluja po sezonama, pristupilo se detaljnijoj analizi zimske sezone (DJF) i to po svim cirkulacijskim tipovima i poddomenama. Rezultati pokazuju kako se smjerovi zavjetrinskih oluja po poddomenama i cirkulacijskim tipovima ne razlikuju značajno.

Proučavana je promjena temperature u područjima nastupa zavjetrinskih oluja, odnosno ima li vjetar burski ili fenski karakter. Budući da se pokazalo kako se cirkulacijski tipovi na poddomenama međusobno klimatološki ne razlikuju, analizirani su pojedini termini koji su uzrokovali najveći broj zavjetrinskih oluja kako bi se pokušao ustanoviti uzrok tomu. Izabrano je pet primjera: dominantno hlađenje, dominantno grijanje, dva termina gdje je jasna podjela između hlađenja i grijanja te heterogeni slučaj kojeg karakterizira nepravilni prostorni raspored grijanja i hlađenja. Razmatranje navedenih slučajeva ukazuje na kompleksnost situacije te pokazuje kako pri proučavanju lokalnih meteoroloških fenomena, kao što su zavjetrinske oluje, više faktora može imati značajnu ulogu.

**Ključne riječi:** ALADIN, AROME, bura, cirkulacijski tip, fen, HCLIM38, klimatski model, NorCP, Skandinavija, temperatura, vjetar, zavjetrinska oluja

# Analysis of downslope windstorms in the Scandes based on a kilometer-scale regional climate model

## Abstract

Downslope windstorms are mesoscale meteorological phenomena that occur in mountainous regions. The hourly average speed of these winds can exceed  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , and the gusts can go up to  $50 - 70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Downslope winds can locally enhance abrupt changes in temperature and other meteorological parameters, but can also negatively affect the environment, and people as well.

The data analysed in this study was obtained by the NorCP project using the HCLIM38-AROME model which is nested in the HCLIM38-ALADIN model grid. Boundary conditions were obtained from the ERA-Interim reanalysis. The simulations covered 20 years, from 1998 to 2017, for the region of the Scandinavian peninsula, or more precisely, the Scandes. Due to their complexity, it is particularly challenging to model and study the effects of the Scandes on the weather. The seas and oceans surrounding the Scandinavian region, steep mountains with abundant intersecting canyons, fjords, and peaks all affect the wind flow, changing it dynamically and thermodynamically.

This study addresses the connection between the synoptic situation and downslope windstorms in four subsequently divided subdomains. Ten large-scale circulation types have been introduced to find potential regularity. After counting the number of downslope windstorms per season, a more detailed analysis of circulation types and subdomains of the winter seasons (DJF) was conducted. The results show that the downslope windstorms' directions per subdomain and circulation types do not differ significantly.

The temperature change in the regions of downslope winds was studied, i.e., if the wind has a bora or foehn character. It was shown how the circulation types on the subdomain do not differ from each other climatologically. To understand why that is, the analysis of individual dates which caused the highest number of downslope windstorms was conducted. Five examples were selected: dominant cooling, dominant heating, two dates where the clear difference between cooling and heating can be seen, and a heterogenous case. The consideration of the mentioned cases indicates the complexity of the situation and shows how numerous factors can play a significant role when trying to understand local meteorological phenomena like downslope windstorms.

**Keywords:** ALADIN, AROME, bora, circulation type, climate model, downslope windstorm, foehn, HCLIM38, NorCP, Scandes, Scandinavia, temperature, wind

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Zavjetrinska oluja</i> . . . . .	1
1.2. <i>Fen</i> . . . . .	2
1.3. <i>Bura</i> . . . . .	5
1.4. <i>Dosadašnja istraživanja s fokusom na područje Skandinavskog gorja</i> . .	6
1.5. <i>Motivacija i cilj istraživanja</i> . . . . .	7
<b>2. Podaci i metode</b>	<b>8</b>
2.1. <i>HCLIM38</i> . . . . .	8
2.2. <i>Projekt NorCP</i> . . . . .	9
2.3. <i>Identifikacija zavjetrinskih oluja</i> . . . . .	10
2.4. <i>Klasifikacija cirkulacijskih tipova</i> . . . . .	10
2.5. <i>Podjela domene na poddomene</i> . . . . .	14
<b>3. Rezultati i diskusija</b>	<b>15</b>
3.1. <i>Evaluacija modela</i> . . . . .	15
3.2. <i>Pojavnost zavjetrinskih oluja</i> . . . . .	16
3.3. <i>Smjer zavjetrinskih oluja</i> . . . . .	18
3.4. <i>Promjena temperature</i> . . . . .	18
3.5. <i>Dominantno hlađenje</i> . . . . .	21
3.6. <i>Dominantno grijanje</i> . . . . .	21
3.7. <i>Podjela hlađenja i grijanja</i> . . . . .	26
3.7.1. <i>Oborina na sjeverozapadnoj obali</i> . . . . .	26
3.7.2. <i>Prolazak tople fronte</i> . . . . .	27
3.8. <i>Neppravilna struktura zagrijavanja i hlađenja</i> . . . . .	27
<b>4. Zaključak</b>	<b>33</b>
<b>Literatura</b>	<b>35</b>
<b>Popis kratica</b>	<b>39</b>
<b>Dodatak A Prolazak tople fronte</b>	<b>40</b>

# 1. Uvod

## 1.1. *Zavjetrinska oluja*

Zavjetrinska oluja (ZO; engl. *downslope windstorm*) mezoskalni je meteorološki fenomen koji se javlja u planinskim predjelima. Vjetar je to čije srednje satne brzine mogu prelaziti  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a udari i  $50 - 70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (npr. Doyle i Shapiro, 2000; Grisogono i Belušić, 2009), nastali strujanjem zraka preko planine i spuštanjem niz strmu zavjetrinu (npr. Durran, 2003). Dinamički razlikujemo katabatički vjetar od ZO-a. Dok je katabatički vjetar uzrokovan samo spuštanjem ohlađenog zraka niz padinu zbog veće gustoće (npr. Egger, 1990; De Wekker i Whiteman, 2006), ZO ima nešto kompliciraniju dinamiku. Pri razvoju ZO-a uglavnom se radi o dubljem sloju zraka te je potrebno obratiti pažnju i na navjetrinu planine, gdje se strujanje već ubrzava (Smith, 1987), što nikako nije slučaj kod katabatičkog vjetra.

Neki od poznatijih zavjetrinskih vjetrova na svijetu jesu fen (njem. *foehn*) u Alpama, *chinook* na području Stjenjaka, *Santa Ana* u južnoj Kaliforniji, *zonda* u Argentini te hrvatska *bura* (npr. Abatzoglou i sur., 2021; Romanić, 2019; Kozmar i Grisogono, 2021).

Za ZO je bitna interakcija strujanja i prepreke (Doyle i Shapiro, 2000), s njom povezan nastanak i lom valova (Klemp i Durran, 1987) te visina kritičnog nivoa. Kritični nivo jest visina na kojoj je fazna brzina uzgonskih valova jednaka brzini okolnog zraka (npr. Grisogono i Belušić, 2009). Isto tako, važno je i postojanje inverzije, odnosno stabilnog sloja zraka. Upravo najveće brzine vjetra u zavjetrini povezane su s tri osnovne situacije (Durran, 2003; Grisogono i Belušić, 2009):

- rast amplitude stacionarnog planinskog vala, njegovo naginjanje i na kraju lom – kritični nivo induciran valom,
- postojanje niskog kritičnog nivoa koji ne dopušta razvoj planinskih valova – potiče njihov lom kako mu se približavaju (nelinearni efekti),
- temperaturna inverzija u razini je vrha planine (Vosper, 2004).

Rezultat svakog od navedenih procesa odvajanje je niskog, brzog toka od sloja iznad koji može biti turbulentan i dobro izmiješan ili stabilan. Navedeni procesi mogu se javiti i u kombinaciji, što može rezultirati još bržim vjetrom. Jake zavjetrinske oluje mogu se dogoditi i prelaskom tople fronte preko strme orografije (Doyle i Shapiro, 2000).

Ugrubo, ZO-e mogli bismo podijeliti na one s fenskim karakterom koji zagrijavaju zavjetrinu te one s burskim karakterom koji ju hlade. Osim u karakteru zagrijavanja odnosno hlađenja, ne postoji značajna razlika u dinamici navedenih vjetrova (Durran, 2003). Oba vjetra u navjetrini imaju izdignuti sloj povećane statičke stabilnosti koji se počinje spuštati prema planini.



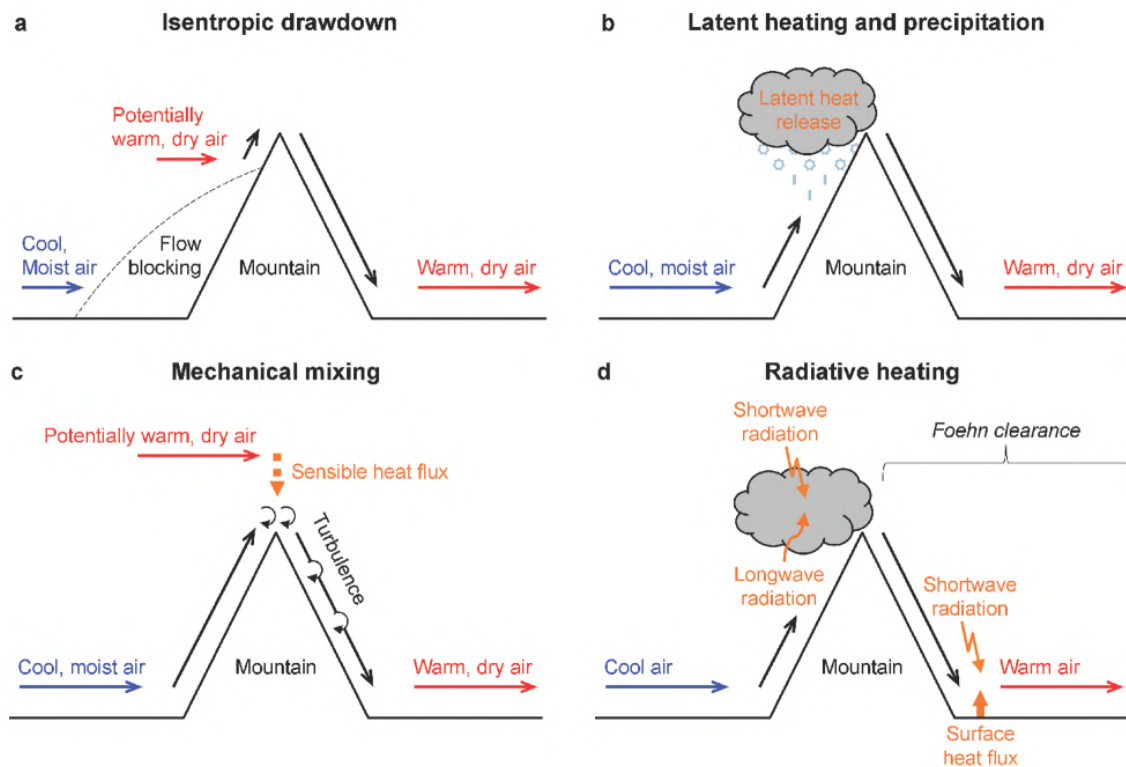
## 1.2. Fen

Fen je topao, suh vjetar koji puše u zavjetrini planine. Uzroci njegove topline nisu se dugo znali, kamoli mogli kvantificirati. Seibert (1990) je pokazao kako za fen nije nužan nastanak oborine u navjetrini. Elvidge i Renfrew (2016) navode kako su tri procesa bitna za zagrijavanje vjetra: (a) izentropsko povlačenje, (b) latentno zagrijavanje i oborina te (c) mehaničko miješanje uzrokovano turbulencijom.

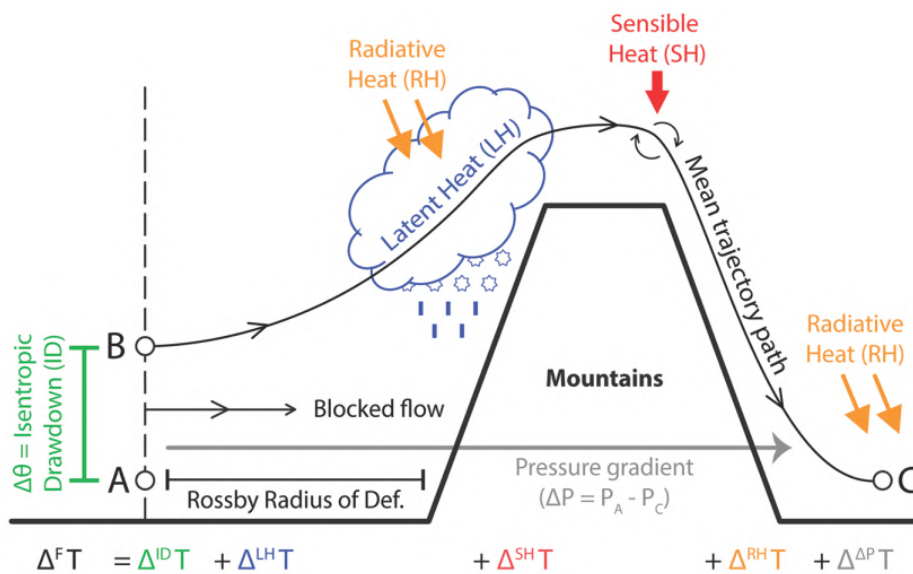
Izentropsko povlačenje (engl. *isentropic drawdown*) u suštini je advekcija potencijalno toplijeg, sušeg zraka koji se nalazi na visini te njegovo spuštanje niz padinu. To se događa kad hladniji i vlažniji zrak nema dovoljno energije da prijeđe prepreku, nego se zaustavi ispred nje (slika 1.1a). Latentno zagrijavanje i oborina (engl. *latent heating and precipitation*) predstavlja klasično termodinamičko objašnjenje zagrijavanja fena: hladan zrak diže se uz prepreku, počinje kondenzacija koja oslobađa latentnu toplinu i grije okolni zrak, a posljedično iz oblaka ispada oborina (engl. *latent heating and precipitation*). Takav suhi zrak spuštajući se grije po suhoadijabatskoj stopi (slika 1.1b). Mehaničko miješanje (engl. *mechanical mixing*; slika 1.1c) događa se prelaskom hladnijeg zraka preko vrha planine u stabilno stratificiranoj atmosferi, pri čemu prolazi ispod toplijeg i sušeg zraka s kojim počinje međudjelovati i turbulentno se miješati. O konkretnoj situaciji ovisi koji će od procesa imati najveći doprinos zagrijavanju. Spominje se i zagrijavanje zračenjem (engl. *radiative heating*) kao četvrti mehanizam (slika 1.1d), koji se ne smije zanemariti ako su tokovi zračenja značajni. Kao posljedica opisanih procesa, događa se da je u zavjetrini tzv. "čistina" zbog toplog i suhog zraka (engl. *foehn clearance* ili *foehn gap*) i to je područje pogodno za radijacijsko zagrijavanje podloge i zraka iznad nje. Na navjetrinskoj strani često je oblačno, što onemogućuje sunčevim zrakama da zagriju tlo.

Doprinosi svakog od mehanizama na čest zraka koja putuje od točke A do točke C prikazani su na slici 1.2. Zagrijavanje fena definirano je kao promjena temperature između točaka C i A. Za slučajeve s izentropskim povlačenjem bitna je točka B jer zbog blokiranja toka zrak iz točke A neće prijeći planinu, već potencijalno topliji zrak s visine. Tijekom puhanja fena, zbog navedenih procesa u zavjetrini će se stvoriti lokalno niži tlak zraka (Gaffin, 2009), a zbog blokiranja toka u navjetrini će biti viši tlak zraka. Stvorit će se gradijent tlaka koji će rezultirati negativnim doprinosom zagrijavanju u zavjetrini.

Elvidge i Renfrew (2016) pokazuju kako je zagrijavanje jače u područjima koja nisu na samom udaru strujanja fena. Područja koja bilježe najveći porast temperature nalaze se pored mlaza fena, a vjetar tamo je generalno slabiji te je to područje turbulentno. Turbulencija je uzrokovana smicanjem zbog naglog usporavanja strujanja na rubu mlaza. U istom radu, kvantitativno su izračunati pojedini doprinosi od mehanizama zagrijavanja fena. Najveći utjecaj imaju izentropsko povlačenje i latentno zagrijavanje, a mehaničko miješanje doprinosi i s preko 20 % ukupnog zagrijavanja. Dakako, koliko pojedini član doprinosi može varirati te će ovisiti o konkretnoj situaciji.



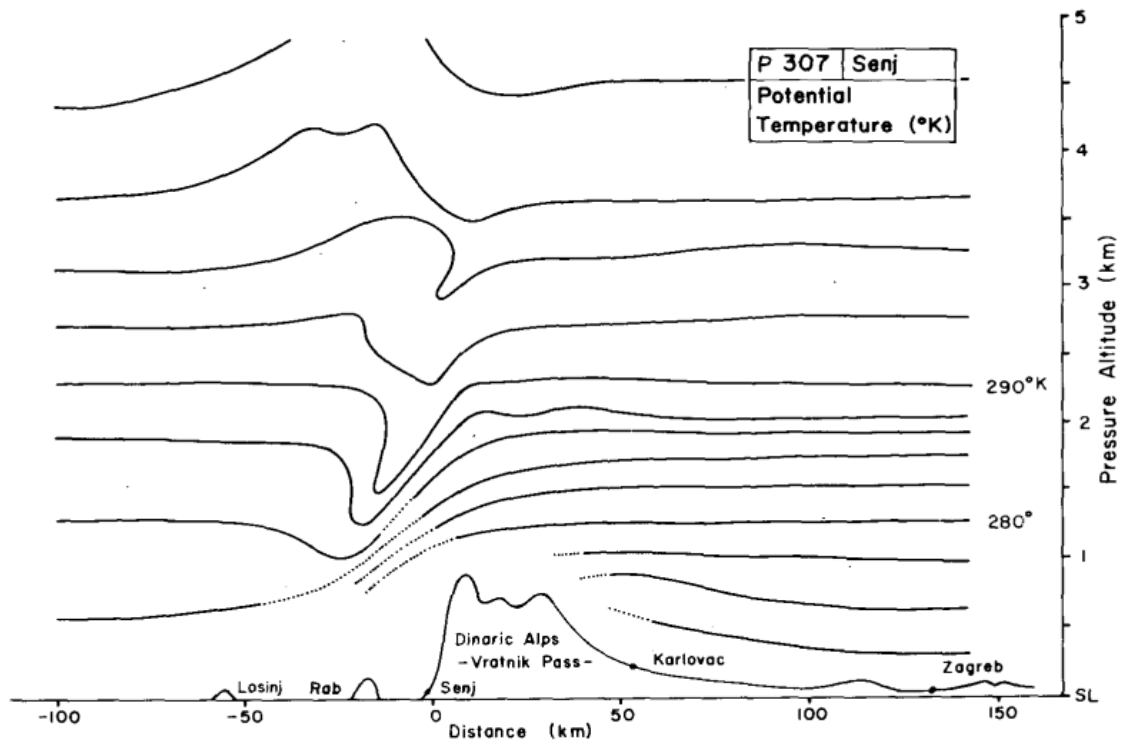
Slika 1.1. Mehanizmi zagrijavanja fena. (a) Blokiranje toka hladnim, vlažnim zrakom dopušta potencijalno toplijem i sušem zrakom s visine da advektira i spusti se niz padinu. (b) Ako nema blokiranja toka, zrak se diže uz padinu, hladi i kondenzira pri čemu se oslobađa latentna toplina; oborinom se uklanja vlaga iz česti zraka te se na navjetrini čest zagrijava suhoadijabatskom stopom. (c) Prelaskom suhog i vlažnog zraka preko planine, on će se mehanički miješati s toplijim i uglavnom sušim zrakom iznad njega (u statički stabilnoj atmosferi). (d) Kao rezultat prethodno opisanih procesa, u zavjetrini će biti čistina (tzv. *foehn clearance* ili *foehn gap*), a u navjetrini može biti oblačno: takva situacija rezultirat će smanjenim radijacijskim tokom u navjetrini, a povećanim u zavjetrini što će tamo potaknuti zagrijavanje. (Preuzeto iz Elvidge i Renfrew, 2016; slika 1)



Slika 1.2. Zagrijavanje česti zraka koja prelazi planinu od točke A do točke C.  $\Delta^{ID}T$  (zeleno) predstavlja izentropsko povlačenje,  $\Delta^{LH}T$  (plavo) latentno zagrijavanje i oborinu,  $\Delta^{SH}T$  (crveno) senzibilnu toplinu zbog mehaničkog miješanja,  $\Delta^{RH}T$  (narančasto) radijacijsko zagrijavanje, a  $\Delta^{\Delta P}T$  (sivo) hlađenje zbog gradijenta tlaka.  $\Delta^F T$  (crno) je ukupno zagrijavanje. (Preuzeto iz Elvidge i Renfrew, 2016; slika 6a)

### 1.3. Bura

Bura je najčešće hladan, mahovit vjetar za čiji je nastanak ključna zaliha vrlo hladnog zraka u orografskom bazenu u navjetrini planine (Smith, 1987) te pogodna sinoptička situacija. Na primjeru Hrvatske, pogodna sinoptička situacija jest ciklona iznad Jadrana ili anticiklona iznad srednje Europe. Zbog odgovarajućeg gradijenta tlaka zraka, hladan zrak će početi strujati prema Jadranskomu moru. Kao što se može vidjeti na slici 1.3, u navjetrini je nastupila inverzija, sloj povećane statičke stabilnosti, te se tamo nalazi dubok sloj hladnog zraka. Izentrope blizu vrha planine spuštaju se prema samom vrhu i u zavjetrinu. Spuštanje izentropa iznad planine za efekt ima dodatno ubrzavanje vjetra u navjetrini zbog a) dodatne pogodne razlike tlakova, te b) zakona očuvanja toka između spuštajuće izentrope i terena koji se diže (Smith, 1987). Hladan zrak s kontinenta tako struji preko planine i spušta se u zavjetrinu gdje hladi relativno toplo područje. Na slici 1.3 može se otprilike iznad Senja vidjeti naginjanje, postupno savijanje i djelomičan lom izentropa. Dinamika opisana u potpoglavlju 1.1. vrijedi za buru.



Slika 1.3. Vertikalni presjek za jedan termin puhanja bure kod Senja - izentrope. (Preuzeto iz Smith, 1987; slika 6b)

#### 1.4. *Dosadašnja istraživanja s fokusom na područje Skandinavskog gorja*

Istraživanja ZO-a fokusirana su više na mezoskalu i sinoptičku skalu te na pojedine slučajeve ZO-a koji su razmatrani. Pristupi na većim prostornim ili vremenskim skalama nisu česti.

Pet slučaja olujnog vjetera obradili su Harstveit i sur. (1995) te su doveli u vezu pojavu lokalnog olujnog vjetera i sloja povećane stabilnosti ispred tople ili okludirane fronte koja prelazi preko južnih Norveških planina. Ispred tople fronte nalazi se stabilniji stupac zraka. Približavanjem tople fronte, prvo dolazi topliji zrak na visini. Povezivanje stabilnog stupca zraka ispod tople fronte i toplijeg, manje stabilnog zraka iznad, može rezultirati ZO-om. Spominje se kompleksnost analize nakon interakcije fronte s orografijom. Također, povezuju planinske valove sa ZO-ima (Smith, 1985). Ukazuje se na važnost utjecaja uzlaznih gibanja na planinske valove. Ako uzlazna gibanja nisu vidljiva u modelu ili nisu dobro parametrizirana, hidrostatski model neće vidjeti mogući lom planinskih valova koje brza uzlazna gibanja mogu uzrokovati. Stoga, već tada se potiče razvoj i uporaba nehidrostatičkih modela fine rezolucije.

Grønås (1997) navodi kako utjecaj na strujanje u području Skandinavije imaju procesi svih skala. Na većoj skali rotacija Zemlje bitno utječe na strujanje. Orografija igra bitnu, ako ne i ključnu ulogu: Skandinavija je okružena morem, što je povoljno za ubrzavanje vjetera zbog manjeg trenja i statičke stabilnosti te je izvor vlage. Strmo gorje Skandinavskog poluotoka pogodno je za prisilno dizanje zraka i induciranje orografske oborine koja može biti obilna, posebno na zapadnoj obali. Oborinom se oslobađa latentna toplina koja može utjecati na daljnji tok strujanja preko planine. Na manjim skalama javlja se proces separacije toka (Baines, 1995), što može uzrokovati vrlo jak vjetar u udolinama sa strmim stranama. Istraživanja pokazuju kako najveće štete od vjetera nastaju upravo u zavjetrini malih planina (horizontalna dimenzija  $\sim 500 - 2000$  m, visina  $\sim 100 - 1000$  m; Grønås, 1997).

Krajem prošlog stoljeća provedene su simulacije visoke rezolucije meteorološkim numeričkim nehidrostatičkim modelom MEMO (*Mesoscale Model*; npr. Moussiopoulos, 1994, 1995), a cilj istraživanja bio je objasniti pojavu jakog vjetera iznad strme orografije Norveške (Grønås i Sandvik, 1999). Korak mreže u modelu iznosio je 270 m. Rezultati eksperimenta pokazali su separaciju toka u dolini (suprotan smjer vjetera u dnu doline) te je ukazano na kompleksnost lokalnih vjetrova na području Skandinavije, ali i potrebu za visokom rezolucijom u proučavanju ZO-a. Potrebu za korakom mreže modela manjim od 4 km u istraživanju ZO-a naglašavaju i Cao i Fovell (2016).

Sandvik i Harstveit (2005) koristili su također nehidrostatički model MEMO i proučavali su jedan slučaj ZO-a koji je karakterizirao sjeverozapadni vjetar na visini. Spominje se koncept odvajanja toka u zavjetrini zbog strme orografije. Zbog vertikalnog smicanja takav zrak u dolini počinje se rotirati – formira se rotor. Dodatno, horizontalno smicanje takav rotor rasteže i nastaje 3D spiralna struktura (poput "vadičepa") koja producira vrlo jak i turbulentan vjetar. Kao važnu ulogu u postizanju izrazito velike brzine vjetera navode koncept hidrauličkog skoka (npr. Holton, 2004) i rotora

(Doyle i Durran, 2002), koje je svojevremeno proučavao i Mohorovičić (Mohorovičić, 1889; Grubišić i Orlić, 2007).

Istraživanja klime modelima visoke rezolucije na području Skandinavije nisu bila mnogobrojna. Na području Skandinavskog poluotoka proveden je projekt NorCP (engl. *Nordic Convection Permitting Climate Projections*; Lind i sur., 2020), koji je ukazao na korisnost i dodanu vrijednost simuliranja modelima visoke rezolucije, tzv. regionalnim klimatskim modelima koji dozvoljavaju konvekciju (engl. *convection-permitting regional climate model* – CPRCM). Lind i sur. (2020) u svojem su radu veću težinu stavili na proučavanje oborine (kao i Méduš i sur., 2022), a samo su se rubno dotaknuli cirkulacije, i to one na velikoj skali. Strujanje iznad Skandinavije i sjeverne Europe dominantno je zapadno tijekom hladnog dijela godine, a tijekom toplog dijela godine raste srednji tlak zraka na razini mora (engl. *mean sea-level pressure* – MSLP) i slabe gradijenti, što rezultira slabijim i manje učestalim vjetrovom.

### **1.5. Motivacija i cilj istraživanja**

Diljem svijeta postoje lokacije na kojima se ZO-i javljaju barem 60 dana godišnje (npr. Romanić, 2019; Abatzoglou i sur., 2021). Vjetar čije srednje satne brzine premašuju  $20 \text{ m s}^{-1}$ , a udari i  $50 - 70 \text{ m s}^{-1}$ , malo kome nisu zanimljivi te važni za proučavanje. Dodatno, ZO-i mogu pospješiti lokalno nagle promjene u temperaturi i drugim meteorološkim parametrima te na taj način nepovoljno djelovati na ljude i okoliš. Fensko zagrijavanje može dosegnuti i zadivljujućih  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  u sat vremena (Richner i Hächler, 2013). ZO-i i pojave povezane s njima mogu rezultirati rasplamsavanjem požara (npr. Nauslar i sur., 2018; Kartsios i sur., 2021; Čavlina Tomašević i sur., 2022) i velikim štetama (npr. Harstveit i sur., 1995; Sandvik i Harstveit, 2005; Kozmar i Grisogono, 2021), a njihov mehanizam i dinamika nisu potpuno jednostavni i do kraja razjašnjeni. ZO-i se mogu u nekim regijama iskoristiti i kao izvor energije (Romanić i sur., 2015).

Dodatna komplikacija u radu složena je orografija Skandinavije s mnogo fjordova, strmim planinama i udolinama koje se pružaju u svim geografskim smjerovima. Tako složena orografija značajno utječe na vremenske prilike na mezoskali.

Kao što je vidljivo iz prethodnog potpoglavlja (1.4.), nije se provelo mnogo klimatoloških istraživanja ZO-a na području Skandinavije. Razlog tome je što je za pojavu koja se odvija na prostorno maloj domeni potreban klimatski model visoke rezolucije, a samim time i značajni računalni resursi. To je dobiveno projektom NorCP. Međutim, zasad su se autori više usredotočili na podatke oborine dobivene kroz projekt NorCP, a vjetra su se dotaknuli rubno. Skandinavsko gorje kao domena zanimljivo je zbog izuzetno kompleksne orografije koja u interakciji sa strujanjem može stvarati jake ZO-e. Zaključci bi koristili kao pomoć pri operativnoj prognozi vremena te pravovremenom upozorenju na nadolazeći tip vremena s kojim se povezuju mogući jaki ZO-i.

U ovom je radu cilj bio ispitati postoji li pravilnost pri javljanju ZO-a te njihova povezanost sa sinoptičkom situacijom. Pravilnost je tražena u karakteru puhanja ZO-a – fenskom ili burskom. Također je cilj bio detaljnije istražiti nekoliko odabranih situacija zagrijavanja i hlađenja.

## 2. Podaci i metode

U ovom radu korišteni su podaci dobiveni kroz projekt NorCP simulacijama modelom HCLIM38-AROME za područje Skandinavskog poluotoka. U cijelom radu za smjer vjetra i njegove komponente koristi se meteorološko nazivlje smjera vjetra (npr. zapadni vjetar je onaj koji puše sa zapada prema istoku).

### 2.1. HCLIM38

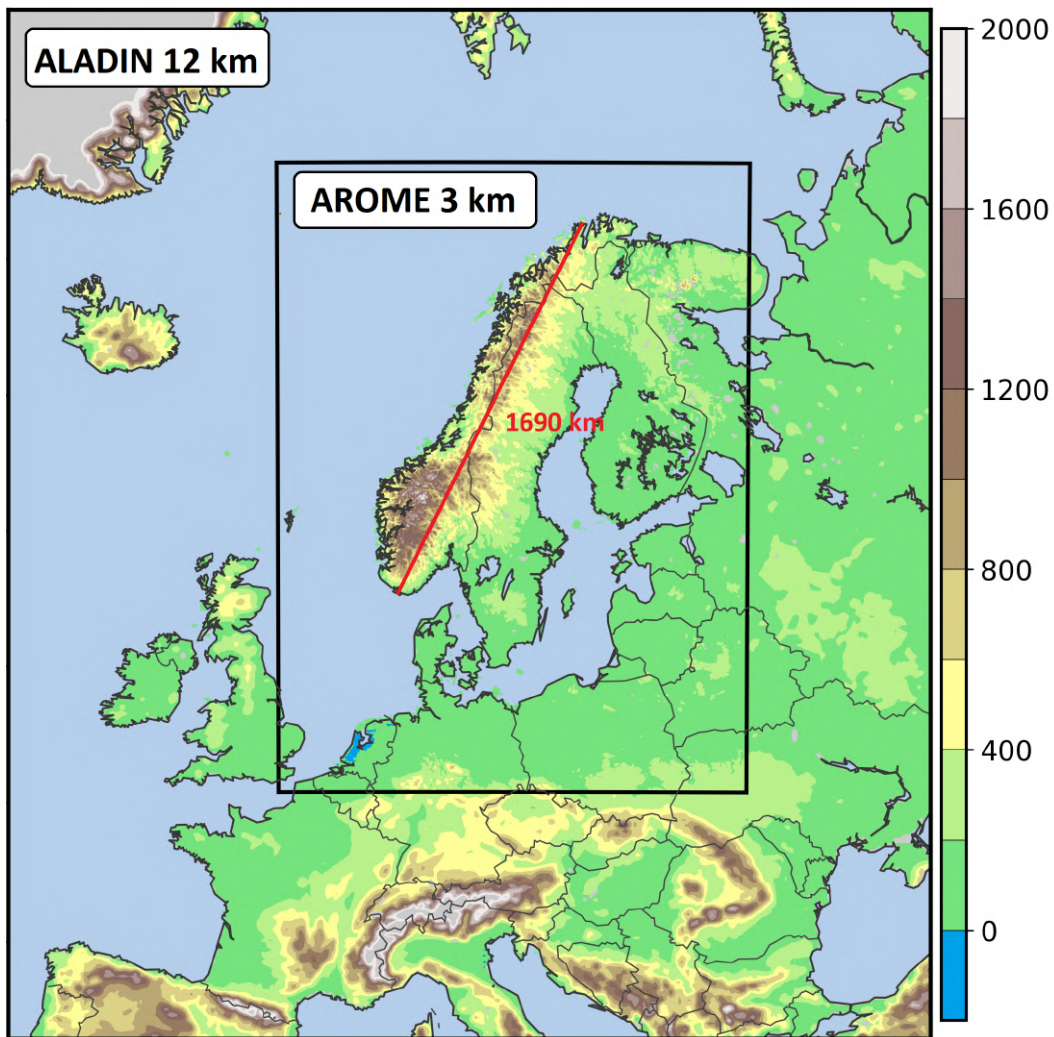
HARMONIE-Climate (HCLIM; Lindstedt i sur., 2015; Lind i sur., 2020) regionalni je numerički klimatski model baziran na HARMONIE-AROME sustavu numeričke prognoze vremena (engl. *numerical weather prediction - NWP*), što je dio ACCORD (<http://www.umr-cnrm.fr/accord/>; bivši ALADIN-HIRLAM) NWP sustava (nastao suradnjom ALADIN grupe i HIRLAM grupe).

HCLIM38 je 38. ciklus HCLIM-a koji su razvili državni meteorološki instituti iz udruženja HIRLAM: AEMET (Španjolska), DMI (Danska), FMI (Finska), KNMI (Nizozemska), MET Norway i SMHI (Švedska). Glavni fokus HCLIM-a klimatsko je modeliranje na manjim prostornim skalama koje razaznaju duboku konvekciju, odnosno duboka konvekcija nije parametrizirana u modelu (CPRCM) te je s tim ciljem i razvijen HARMONIE-AROME model (Belušić i sur., 2020). HARMONIE-AROME model korišten je s nehidrostatičkom dinamikom (Bengtsson i sur., 2017). Većina konvektivnih procesa događa se na skalama reda veličine 1 km, što je usporedivo sa skalom CPRCM-a, a mogući konvektivni procesi na manjoj skali riješeni su parametrizacijom plitke konvekcije. U modelima grublje rezolucije ( $\sim 10$  km), kao što je ALADIN (Termonia i sur., 2018), korištena je parametrizacija za duboku konvekciju te hidrostatička aproksimacija.

HCLIM38 slojevito je razvijan model te se temelji na istom kodu kao IFS (engl. *Integrated Forecasting System*) i ARPEGE (franc. *Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle*) modeli, zatim je prilagođen prema ACCORD operativnom NWP modelu, a nakon toga slijedi prilagodba specifičnim klimatskim uvjetima i potrebama. HCLIM38 sastoji se od tri glavne konfiguracije modela: ALADIN, ALARO i HARMONIE-AROME, namijenjene za različite rezolucije. Pogodno je što su sve tri konfiguracije združene s istim modelom za podlogu (tlo), SURFEX-om, čime je ugnježdivanje mreže modela finije rezolucije u model grublje rezolucije olakšan, tzv. *spin-up* modela je kraći. Površinski model združen s HCLIM38-AROME modificiran je u odnosu na AROME NWP tako da bude što bolji za potrebe klimatskog modeliranja, za što su bitne dulje vremenske skale. Uspješno korištenje modela HCLIM38-AROME na regijama od tropskih sve do arktičkih geografskih širina upućuje na to da je model prikladan bez potrebe značajnih modifikacija za pojedina podneblja (Belušić i sur., 2020).

## 2.2. Projekt NorCP

Projekt NorCP je projekt unutar kojeg su vršene simulacije modelom HCLIM38-AROME horizontalne rezolucije od 3 km, 65 vertikalnih nivoa i vremenskim korakom od 75 s. Kao što navode Matte i sur. (2017), potreban je međukorak koji će povezati veliki korak mreže GCM-a i mali korak mreže CPRCM-a jer je direktan prijelaz preoštari. Iz tog razloga, u projektu je pomoću modela HCLIM38-ALADIN međukorak gniježđenja iznosio 12 km. ALADIN je imao 65 vertikalnih nivoa i vremenski korak od 300 s, a svaka 3 h opskrbio je ugniježđenu AROME mrežu s podacima na rubu. Kao rubni uvjeti ALADIN-u korišteni su podaci globalne reanalize ERA-Interim (Dee i sur., 2011) s horizontalnom rezolucijom od 80 km i vremenskom od 6 h. U simulaciji je analizirano razdoblje 1997. – 2018. godine, s prvom od navedenih kao *spin-up*, što znači da nije uzeta u obzir pri razmatranju rezultata. ALADIN je pokrивao područje gotovo cijele Europe i sjeveroistočni Atlantik, dok je AROME pokrивao područje Skandinavije te sjevernih država kontinentalne Europe (slika 2.1). Odavde nadalje, naziv AROME odnosi se na HCLIM38-AROME model, a ALADIN na HCLIM38-ALADIN.



Slika 2.1. Prikaz domena: vanjska domena HCLIM38-ALADIN, unutarnja HCLIM38-AROME. Crvena linija predstavlja duljinu Skandinavskog gorja. Skala boja predstavlja nadmorsku visinu.



### 2.3. Identifikacija zavjetrinskih oluja

Abatzoglou i sur. (2021) razvili su konceptualni model za identifikaciju zavjetrinskih vjetrova s ciljem proučavanja ZO-a globalno. Što se tiče orografije, u literaturi se spominje mogući utjecaj asimetrije navjetrinske i zavjetrinske padine (Miller i Durran, 1991) i postojanje barijere koja bi onemogućila strujanju da ide oko planine (Markowski i Richardson, 2011 kako navodi Abatzoglou i sur., 2021), ali ne postoje utvrđene vrijednosti kakav bi teren trebao biti da bude povoljan za ZO. Autori su tako lokalno razmotrili nagib terena te vertikalnu udaljenost od vrha planine. Definirali su lokalni vrh kao maksimalnu nadmorsku visinu na rezoluciji od  $1/24^\circ$  u krugu radijusa 50 km. Za nagib terena koristili su rezolucije i od  $1/24^\circ$  i od  $1/4^\circ$  kako bi dobili što bolje rezultate. Teren pogodan za ZO definiran je zadovoljavanjem oba sljedeća uvjeta:

- (a) lokalni nagib od minimalno 2 %,
- (b) minimalna visinska razlika terena i lokalnog vrha iznosi 200 m.

Model se temelji na tri faktora (slika 2.2) :

- vjetar okomit na pružanje planine (engl. *cross-barrier wind*) pri vrhu planine ( $v_{cb}$ ),
- statička stabilnost ( $\delta\theta/\delta z$ ) na nivou vrha planine ili iznad njega,
- vertikalna brzina ( $\omega$ ) na nivou vrha planine ili ispod njega.

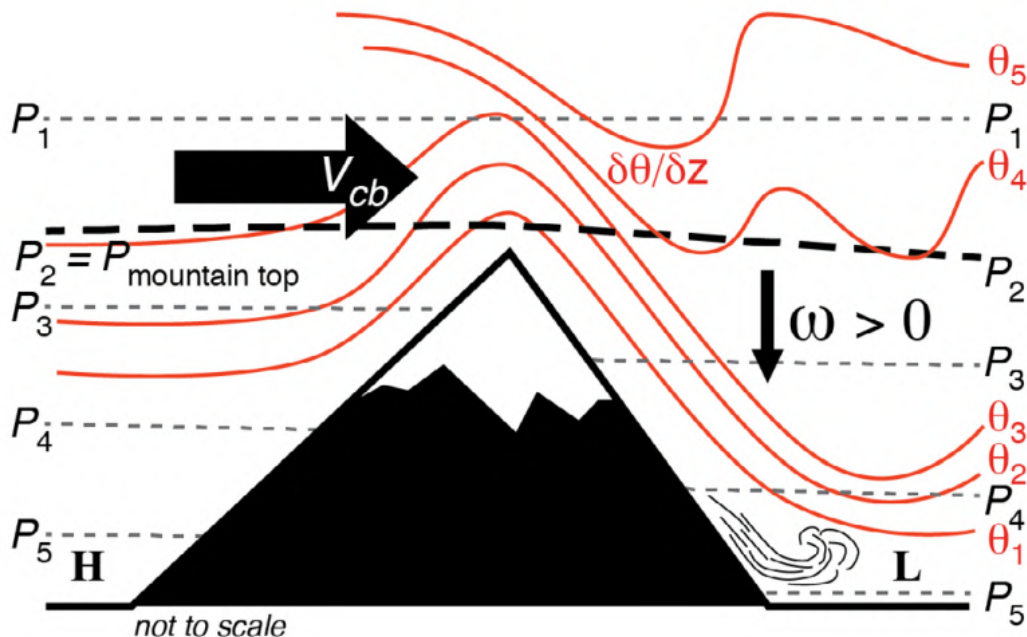
Vjetar okomit na pružanje planine računat je kao srednji vjetar okomit na nagib padine u sloju od lokalnog vrha do za 100 hPa iznad. Iz istog sloja uzet je iznos maksimalne vrijednosti  $\delta\theta/\delta z$ , a za najveću vertikalnu brzinu razmatrale su se sve izobarne plohe od lokalnog vrha do tla.

ZO-i su detektirani ako su na povoljnom terenu zadovoljena sva tri kriterija. U Abatzoglou i sur. (2021) pragovi kriterija određeni su prema objavljenim člancima koji su se bavili brzinom ZO-a te kronologijom regionalnih ZO-a iz jugozapadne Kalifornije. Pragovi su iznosili:  $v_{cb} \geq 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\omega \geq 0.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\delta\theta/\delta z \geq 6 \text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$ .

Pragovi kriterija ponovno su razmotreni za ovaj projekt zbog više rezolucije modela (S. Marimbordes i D. Belušić, osobna komunikacija, 2022.). Prag koji je modificiran vertikalna je brzina koja je morala biti niža od  $-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  kako bi bio detektiran ZO (jača supsidencijska gibanja od  $-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Stvorena je binarna matrica koja omogućuje detekciju ZO-a na domeni Skandinavije.

### 2.4. Klasifikacija cirkulacijskih tipova

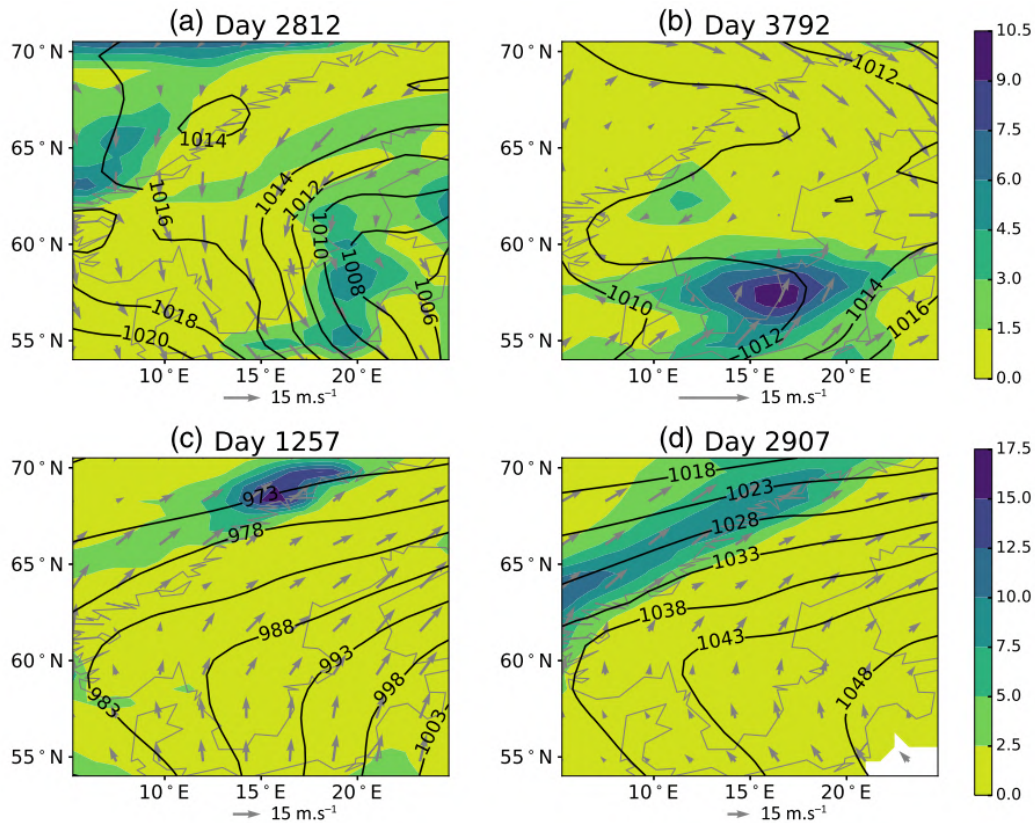
Sa željom da se prepoznaju sinoptički slične situacije koje će uzrokovati vrlo slično vrijeme ili da se istraži varijabilnost atmosfere, potrebno je definirati što znači da su sinoptičke situacije slične. Klasifikacije u suštini uzmu neki vremenski niz prostornog polja (npr. geopotencijala ili MSLP-a) te preko određenih sličnosti i razlika grupiraju



Slika 2.2. Prikaz konceptualnog modela za identifikaciju uvjeta za nastanak ZO-a. Tlak zraka na razini vrha planine ( $P_2$ ) prikazan je debelom isprekidanom linijom. Brzina vjetra okomitog na pružanje planine ( $v_{cb}$ ) izračunata je kao srednjak brzina u sloju od  $P_2$  do  $P_2 - 100$  hPa. Maksimalna veličine  $\delta\theta/\delta z$  izračunat je također iz sloja od planinskog vrha do za 100 hPa iznad. Maksimalna vertikalna brzina uzeta je iz sloja od vrha do najbliže izobarne plohe tlu. H (engl. *high*) i L (engl. *low*) odnose se na područja relativno višeg ili nižeg MSLP-a, redom. (Preuzeto iz Abatzoglou i sur., 2021; slika 1a)

ta polja. Za kvantificiranje sličnosti najčešće se koriste euklidska udaljenost (DIST; npr. Philipp i sur., 2007) i koeficijent korelacije uzorka (CORR; npr. Lund, 1963). Hansen i Belušić (2021) navode da ako su uzorci slični prema CORR-u (visok CORR), vrlo vjerojatno će i na oko biti slični. Suprotno, dva polja slična prema DIST-u (nizak DIST) ne moraju uopće izgledati slično. Primjer se nalazi na slici 2.3. Slike 2.3a i 2.3b slične su po DIST-u, ali su uzorkom polja MSLP-a različite, što rezultira i dosta različitim vremenskim prilikama. Slike 2.3c i 2.3d su po CORR-u slične, a i na oko izgledaju skoro pa jednako. Međutim, može se vidjeti kako im se dosta razlikuju gradijenti tlaka - po DIST-u su različite. Jasno je da se korištenjem različitih metoda klasifikacije mogu dobiti poprilično različiti cirkulacijski tipovi (CT). Stoga, potreban je konzistentan način za klasifikaciju. Hansen i Belušić (2021) pristupili su klasifikaciji spajanjem dva navedena načina (CORR i DIST) preko statističke modifikacije podataka koji ulaze u sustav za klasifikaciju.

Ulazni se podaci mogu standardizirati. To znači (a) da se od originalnih podataka oduzima prostorni srednjak, čime se neće dogoditi ništa drugo do smanjivanja apsolutne amplitude (uzorak i udaljenosti između izolinija ostat će iste), te se tada takvi podaci (b) dijele s prostornom standardnom devijacijom. Time se dobiva polje kojemu su rasap i apsolutni iznos gradijenta smanjeni. Nakon takve manipulacije, prostorna polja koja nisu bila slična, sada to mogu biti. Međutim, potpunom standardizacijom podataka uklanja se previše informacija bitnih za cirkulacijske tipove te Hansen i

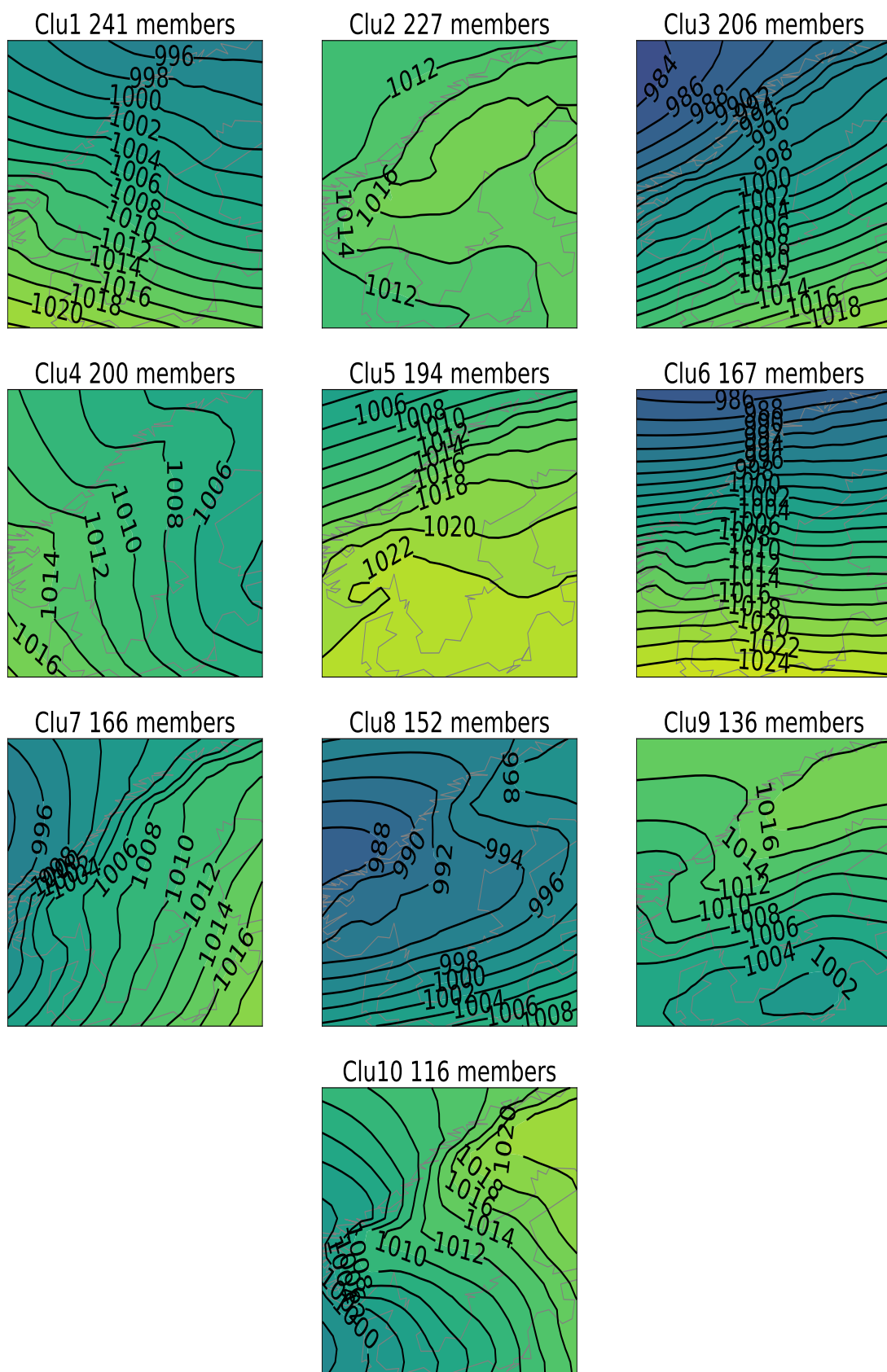


Slika 2.3. Crne pune linije prikazuju tlak zraka na razini mora u hPa, boje prikazuju oborinu u mm, a vektori vjetar na 850 hPa u  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . U prvom redu (a i b) može se vidjeti sličnost prema DIST-u - slična udaljenost izobara, ali mala sličnost uzorka. U drugom redu (c i d) nalaze se dva dana s velikim DIST-om (nisu slični), ali i velikim CORR-om koji ukazuje na sličnost uzorka. (Preuzeto iz Hansen i Belušić, 2021; slika 1)

Belušić (2021) predlažu samo provedbu postupka opisanog pod (a), što se pokazalo najboljim. Takvi podaci tada ulaze u neku od metoda klasifikacije, a najbolja se pokazala automatska metoda klasifikacije SANDRA (engl. *simulated annealing and diversified randomization*; Philipp i sur., 2007) koja se temelji na DIST metodi. SANDRA radi na principu velikog broja ponavljanja i rekombinacije, što znači da se iterativno, svaki put nasumce, provjeravaju i preraspodjeljuju cirkulacijski tipovi.

Na kraju procesa, tako konvergirani cirkulacijski tipovi dobiveni potpuno automatiziranom metodom izuzetno su slični CT-ima koji su subjektivno unaprijed definirani na temelju iskustva stručnjaka drugom metodom (CORR). Modifikacijom ulaznih podataka samo postupkom (a) postiglo se da se u postupku koriste samo relevantne informacije o atmosferskoj cirkulaciji – prostorna struktura i gradijent polja (Hansen i Belušić, 2021).

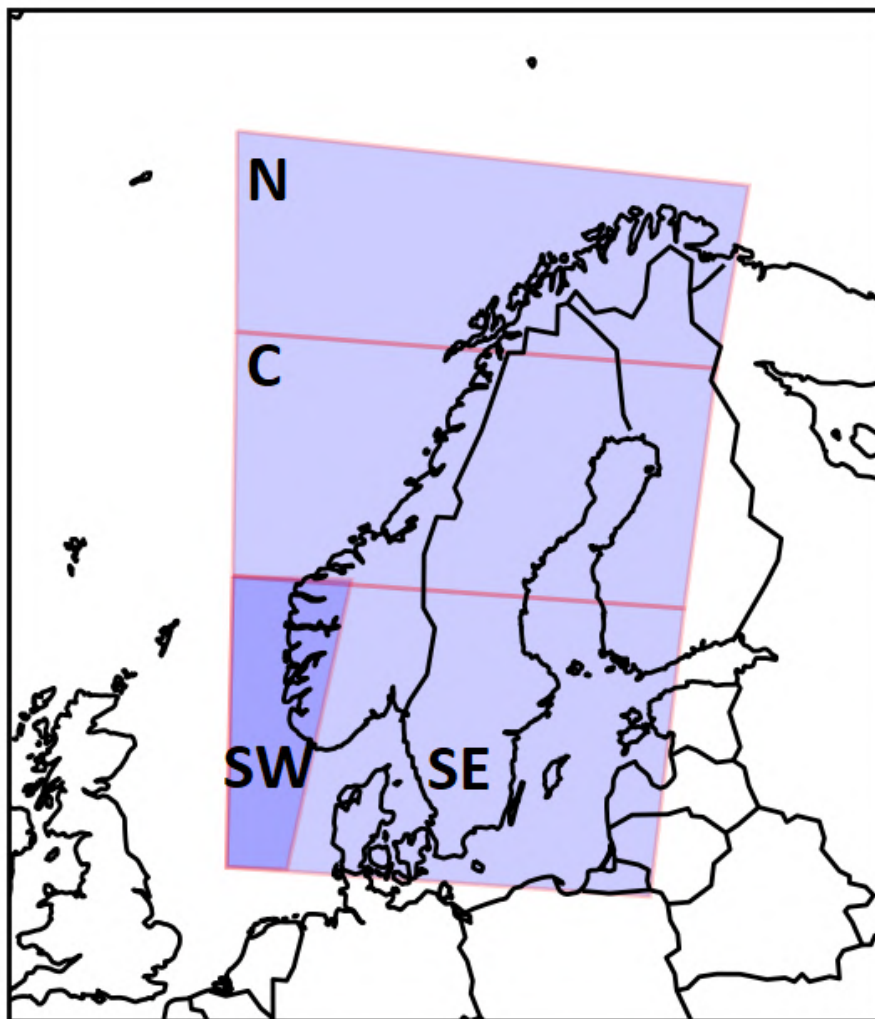
Na slici 2.4 prikazano je 10 najčešćih cirkulacijskih tipova iznad Skandinavije za sezonu DJF. Klasifikaciju je izradila F. Hansen (osebna komunikacija, 2022.) metodom SANDRA. CT-i su poredani po čestini javljanja, tako da je CT 1 najčešći tip, a CT 10 najrjeđi.



Slika 2.4. Cirkulacijski tipovi za Skandinavsko područje – klasifikacija metodom SANDRA. Iznad svake slike piše na koji CT se odnosi – Clu = CT (engl. *cluster*) i broj članova u svakoj grupi. Broj članova odnosi se na broj dana tijekom kojih je vladao CT. (Izradila F. Hansen, osobna komunikacija, 2022.)

## 2.5. Podjela domene na poddomene

S obzirom da je Skandinavski poluotok površinom velik (slika 2.1), prirodno je podijeliti ga na više sektora zbog klimatologije koje može biti različita u svakom od njih. Navedeno može utjecati na traženje pravilnosti. S. Marimbordes (osebna komunikacija, 2022.) podijelila je domenu AROME-a na četiri poddomene prikazane na slici 2.5.

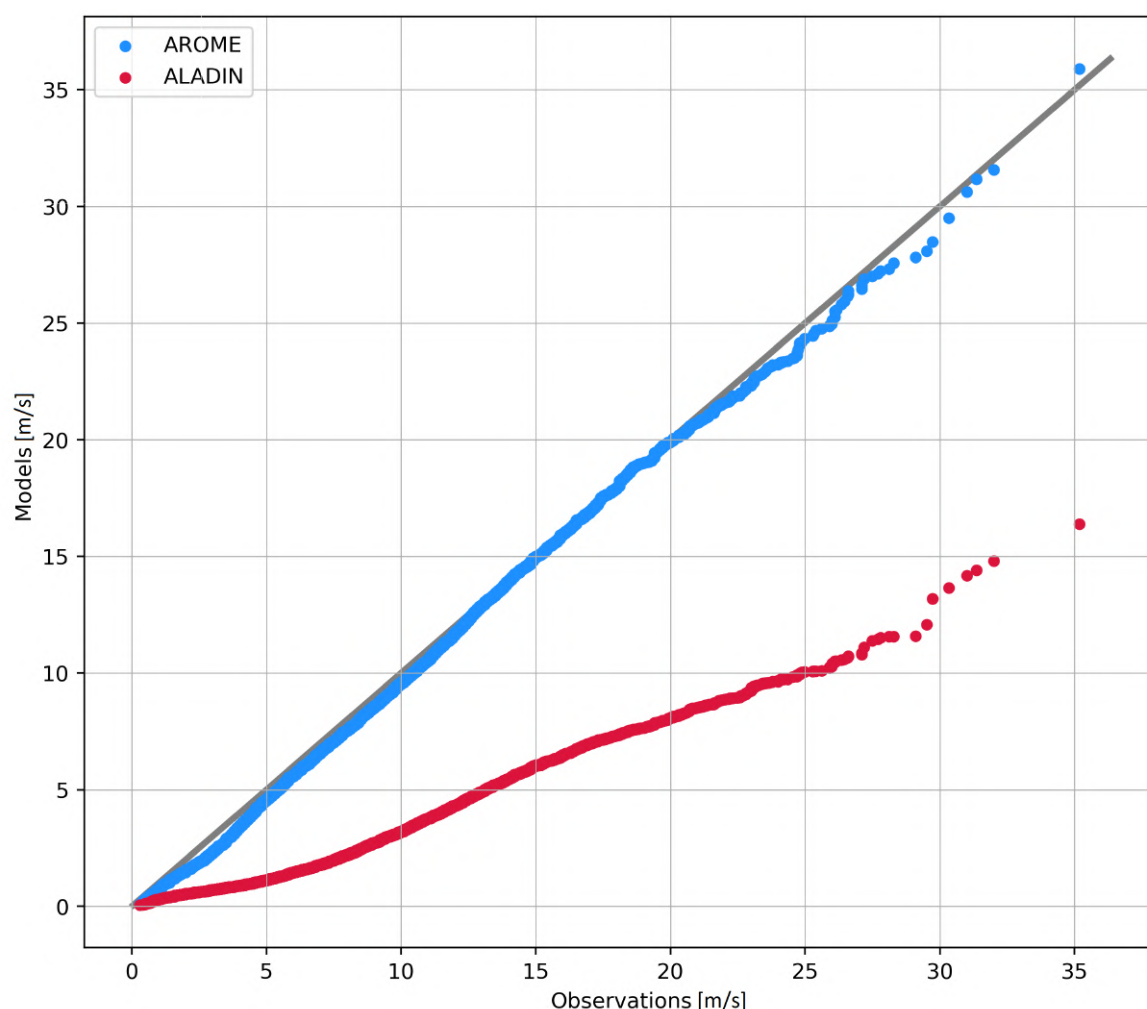


Slika 2.5. Podjela domene na četiri poddomene: sjevernu (N, engl. *north*), centralnu (C, engl. *center*), jugozapadnu (SW, engl. *southwest*) i jugoistočnu (SE, engl. *southeast*). (Izradila S. Marimbordes, osobna komunikacija, 2022.)

### 3. Rezultati i diskusija

#### 3.1. Evaluacija modela

Prethodno ovom radu, S. Marimbordes i D. Belušić (osebna komunikacija, 2022.) provjerali su slaganje simuliranih podataka modelima AROME i ALADIN s mjerenjima u kvantil-kvantil prikazu (tzv. *Q-Q plot*). *Q-Q plot* grafički je prikaz koji uspoređuje dvije raspodjele vjerojatnosti prema odgovarajućim kvantilima. Prvo je određen prevladavajući smjer ZO-a te su uzeti svi ZO-i iz tog smjera  $\pm 30^\circ$ . Uspoređivani su simulirani podaci brzine vjetra iz navedenog raspona smjerova s motrenim podacima za razdoblje 2008. – 2017. godine. Na slici 3.1 može se vidjeti kako AROME odlično simulira podatke mjerenja. Ovdje je prikazan rezultat usporedbe samo za jednu postaju, no i iz prikaza za druge postaje nude se isti zaključci. Stoga, u ovom radu korišten je model HCLIM38-AROME rezolucije 3 km na unutarnjoj domeni sa slike 2.1 s mrežom od 621 x 837 točaka.



Slika 3.1. Kvantil-kvantil grafički prikaz (engl. *Q-Q plot*) brzine vjetra za dominantni raspon smjera iz podataka motrenja i podataka dobivenih HCLIM38-AROME (plavo) i HCLIM38-ALADIN (crveno) modelima. Analiza za postaju Stora Sjöfallet (67.29° N, 18.17° E). (Izradila S. Marimbordes, osobna komunikacija, 2022.)

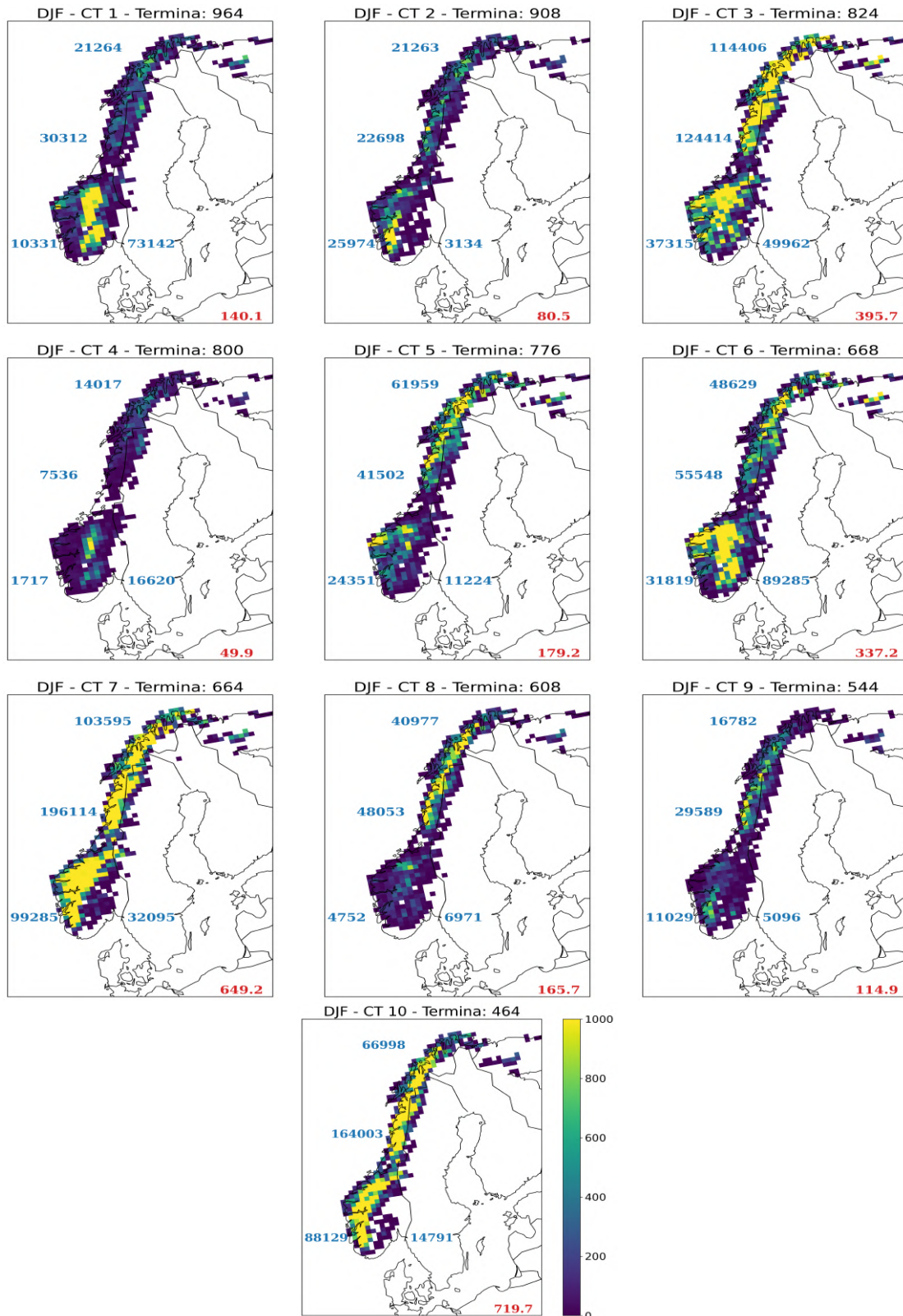
### 3.2. *Pojavnost zavjetrinskih oluja*

Na početku istraživanja, izbrojano je koliko ZO-a je bilo u posljednjih 20 godina po sezonama (u svim točkama mreže po 6-satnim terminima). U proljeće (MAM; engl. *March, April, May*) je izbrojano 784 737 ZO-a, u ljeto (JJA; engl. *June, July, August*) 148 854, a u jesen (SON; engl. *September, October, November*) 1 006 392. Daleko najviše ZO-a na cijeloj domeni bilo je u zimskoj sezoni (DJF; engl. *December, January, February*), čak 1 907 359. Stoga, za potrebe ovoga rada fokus je na sezoni DJF i svi rezultati koji će dalje biti prikazani odnosit će se na tu sezonu. Bitna pojava zimi za zapadnu obalu Skandinavije je Golfska struja koja može utjecati na temperaturnu strukturu ZO-a nad morem (npr. Enger i Grisogono, 1998).

Na slici 3.2 prikazana je pojava ZO-a po poddomenama za sezonu DJF za svaki od CT-ova. ZO-i su razmatrani na rezoluciji od 3 km, no na priloženim slikama prikazani su sumarno na 30 km x 30 km površini radi boljeg razaznavanja. Na svakom od 10 prikaza piše broj termina određenog CT-a, broj ZO-a u pojedinoj poddomeni i pojava ZO-a za određeni CT. Pojava ZO-a je izračunata kao kvocijent ukupnog broja zavjetrinskih oluja na domeni i broja termina.

Vidljivo je kako najčešći tip, CT 1, ne generira velik broj ZO-a, svega 140 po terminu puhanja. Najviše ZO-a po terminu puhanja generira najrjeđi, CT 10, i to čak 719 po terminu. Sljedeći je CT 7 koji ih generira 649, a iza njega slijedi CT 3 s 395 pojava ZO-a po terminu. Za sva tri CT-a najbrojnija po pojavnosti ZO-a, ističe se centralna poddomena kao ona s najviše termina puhanja ZO-a. Najveći broj ZO-a u centralnoj poddomeni ima CT 7, njih 196 114, zatim CT 10 s 164 003 te CT 3 s 124 414. Centralna poddomena ima najveće brojeve iz razloga što se u njoj nalazi niži dio Skandinavskog gorja, odnosno tu se nalazi dio koji dijeli južno Skandinavsko gorje i sjeverno Skandinavsko gorje. Taj niži dio pogodan je za kanaliziranje strujanja jer je vjetru potrebno manje energije za prijelaz orografski nižeg područja. Kad postoji sinoptički i orografski usmjerenost strujanje, ono tada može potaknuti i ZO-e, makar oni bili slabiji. Na velikom broju situacija, koje neće sve biti prikazane u ovom radu, vidljivo je usmjerenost strujanje vjetra upravo tim dijelom gorja. Svi od tri navedena CT-a imaju približno iste relativne brojeve javljanja po poddomenama.

Usporedbom sa slikom 2.4 može se vidjeti kako najveće pojavnosti ZO-a generiraju CT-i s podosta različitim sinoptičkim situacijama. U situacijama s CT-om 10, očekivalo bi se izraženo S – SE strujanje koje se zbog zakretanja izobara prema sjeveru i posljedičnog gradijenta tlaka prebacuje preko Skandinavskog gorja. Očekuje se da takvo strujanje tada uzrokuje i ZO-e koji će pratiti smjer sinoptičkog vjetra. U slučaju CT-a 7, strujanje će biti dominantno S – SW. Ovdje se očekuje da je strujanje uz izobare, a pri dolasku blizu planine zbog gradijenta tlaka bude prebačeno prema Atlantiku. Za CT 3 očekuje se strujanje koje se račva na dva toka: jedan zapadno od kopna uz obalu, a drugi preko kopna. U tom slučaju ne očekuje se velik broj ZO-a koji će nastati prebacivanjem zraka prema Atlantiku (SE smjera), već češće ZO-ima SW smjera, nastalim spuštanjem zraka na klance gorja koji su položeni okomito strujanju.



Slika 3.2. Pojava ZO-a po poddomenama i CT-ima. Iznad svake slike piše sezona (DJF), CT na koji se odnosi i u koliko termina je zabilježen CT. Na slikama se plavom bojom nalazi napisan broj termina ZO-a po poddomenama. Crvenom je bojom napisana pojavnost ZO-a za određeni CT (apsolutni broj podijeljen s brojem termina određenog CT-a).



### 3.3. *Smjer zavjetrinskih oluja*

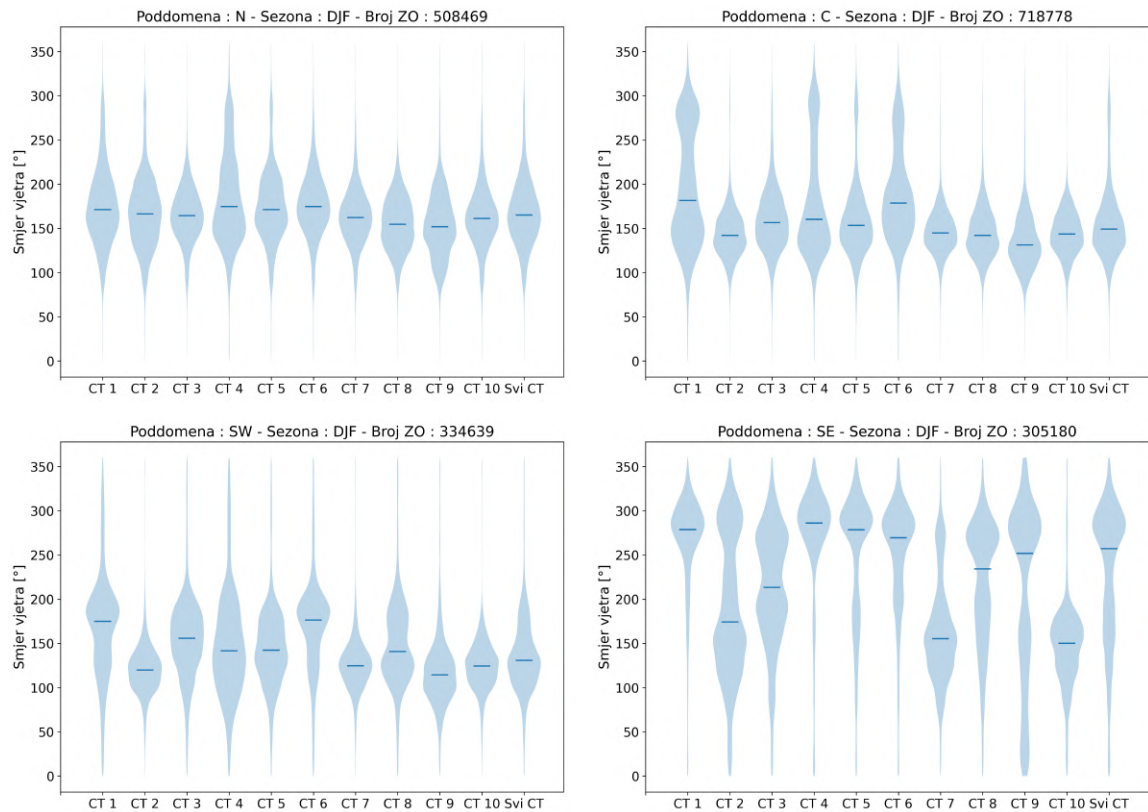
Za detaljniju analizu smjera ZO-a, na slici 3.3 nalaze se violinski prikazi (tzv. *violin-plot*) smjera ZO-a po poddomenama za sve CT-e.

Za tri iznad navedena CT-a (3, 7 i 10), smjer ZO-a koji prevladava jest južni i jugoistočni u svim poddomenama, što je u skladu s CT-ima. Za CT 3 u poddomeni SE ističe se podjela smjera na južni, koji će ići prema Atlantiku zbog povoljnog gradijenta tlaka, te zapadni koji je posljedica usmjerenog sinoptičkog strujanja na domeni, što je upravo očekivano i opisano na kraju prethodnog odlomka. Općenito se uočava razlika SE poddomene, u kojoj je vjetar češće zapadnog smjera, u odnosu na druge. Razlog leži u međugri orografije i strujanja, a i u podjeli na poddomene. U tom području gorje je manje zastupljeno (orografija je niža) i nalazi se na zapadu poddomene, uz SW poddomenu. Iz tog razloga, istočni vjetar češće će stvarati ZO-e u poddomeni SW, a zapadni u SE.

Iznad gorja mogu se vidjeti perturbacije na izobarama, što rezultira time da će dio toka skrenuti prema sjeveru uz NW obalu Norveške, umjesto izravnog prijelaza cijelog toka zraka preko planine u unutrašnjost (npr. CT 4). CT 4 dobro je proučiti jer je i cirkulacijski tip koji rezultira najmanjim brojem ZO-a. Prvo što se može uočiti jest dosta manji gradijent nego kod ostalih CT-a, što je direktan uzrok sporijem strujanju koje neće moći prebaciti planinu. Zbog perturbacija na izobarama, može se stvoriti gradijent tlaka okomit na planinu upravo dovoljan za prebacivanje zraka preko planine iz unutrašnjosti prema Atlantiku, što je ovdje kod CT 4 i slučaj. Iako bi se mogao očekivati jači signal od sjevernog i sjeverozapadnog vjetra gledajući sinoptičku situaciju, to se ispuni samo u SE poddomeni. Znači da upravo perturbacije izobara nad tako kompleksnom orografijom utječu na veći broj južnih smjerova. Razlog se može tražiti i u stupnju nagiba orografije. U prijašnjim istraživanjima navedeno je kako asimetričnost i nagib planine može utjecati na ZO te upravo ovdje to može biti slučaj jer je zapadna strana dosta strmija od istočne. CT 2 ima izražen centar visokog tlaka zraka nad Skandinavskim poluotokom. Gradijenti kao i kod CT 4 nisu veliki. Anticiklonalno vrijeme iznad Skandinavije, kao što se može vidjeti na slici 3.2, ne uzrokuje velik broj ZO-a. Općenito, ZO-i najčešće pušu iz smjerova s južnom komponentom, osim za SE poddomenu. Ovaj zaključak donekle neočekivano ne ovisi o vrsti CT-a.

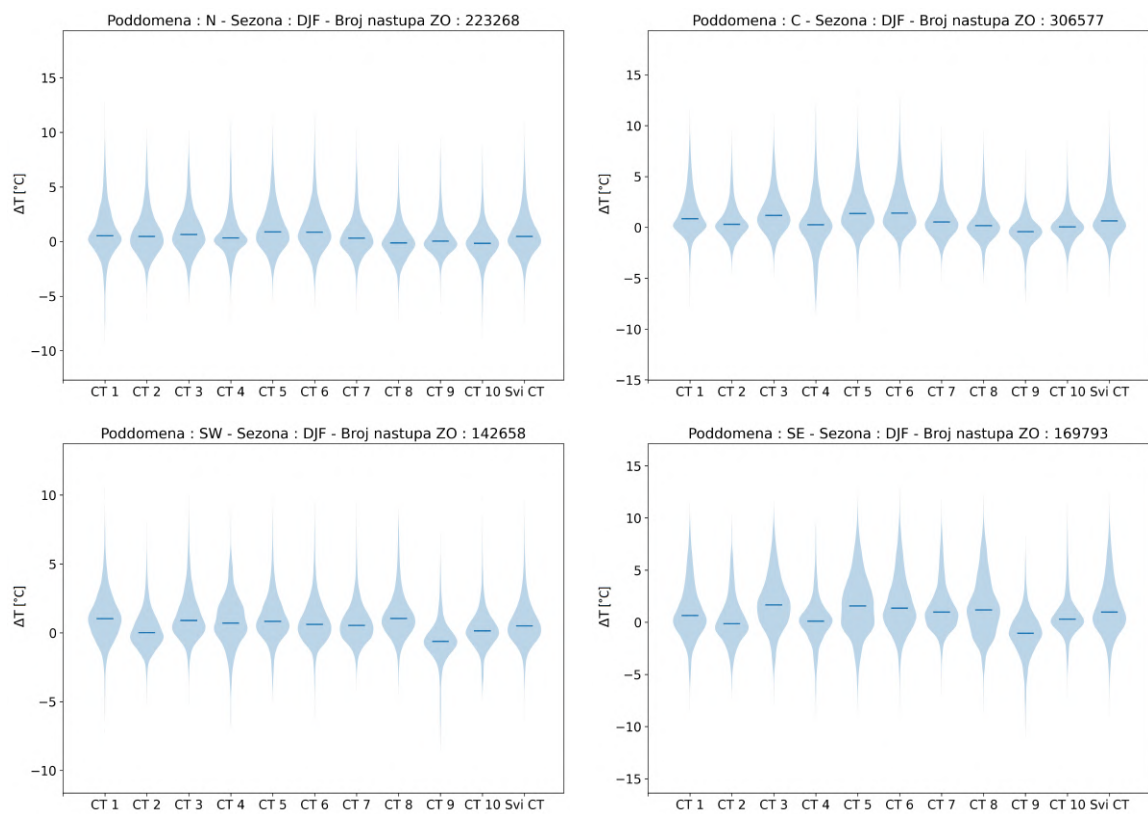
### 3.4. *Promjena temperature*

Velik dio istraživanja bila je promjena temperature uzrokovana ZO-ima. Na početku, prikazan je violinski graf (engl. *violin-plot*) promjene temperature za sve CT-e i sve poddomene (slika 3.4). Promjena temperature računa se kao razlika temperature na 2 m u terminu kad je prvi put zabilježen ZO i termina 6 h prije. Na taj način, gleda se kako početak puhanja ZO-a utječe na promjenu temperature. S grafičkih prikaza očitava se kako zatopljenja i zahlađenja nisu velika te da su dvoznamenkaste promjene u temperaturi ekstremne pojave. Generalno, svi CT-i centrirani su približno oko nule i mogu donijeti i zahlađenja i zatopljenja. Postojala su očekivanja da će se uočiti razlike u temperaturi za različite CT-e. CT-i su sinoptički različito postavljeni te zrak dolazi s različitih strana, što može imati za posljedicu različit karakter ZO-a. Kako ta



Slika 3.3. Violinski prikaz (tzv. *violin-plot*) smjera zavjetrinskih oluja za poddomene za sve CT-ove. Tamna linija na svakoj "violini" predstavlja medijan raspodjele.

očekivanja nisu ispunjena, sljedeći je korak поближе pogledati što se događa te pokušati shvatiti zašto klimatološki nema izraženije pravilnosti, odnosno razlike. Razmatrat će se određeni termini u kojima je broj točaka mreže gdje puše ZO maksimalan za određenu poddomenu i CT - takav termin bit će označen s  $T$ . Termini koji prethode terminu s maksimalnim brojem ZO-a bit će označeni s  $T-1$ ,  $T-2$  i  $T-3$ , a predstavljat će 6 h prije  $T$ , 12 h prije  $T$  i 18 h prije  $T$ , redom.



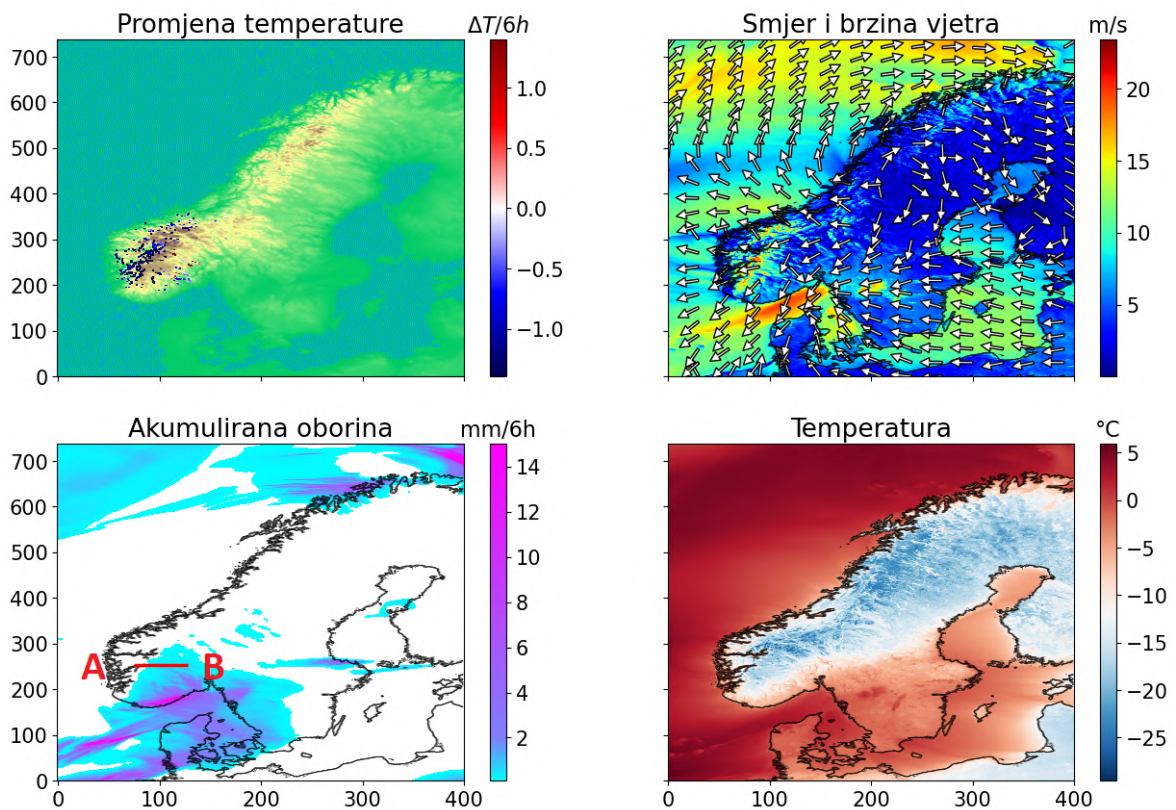
Slika 3.4. Violinski prikaz (tzv. *violin-plot*) promjene temperature u terminu kad je zapuhala ZO za poddomene za sve CT-ove. Tamna linija na svakoj "violini" predstavlja medijan raspodjele.

### 3.5. *Dominantno hlađenje*

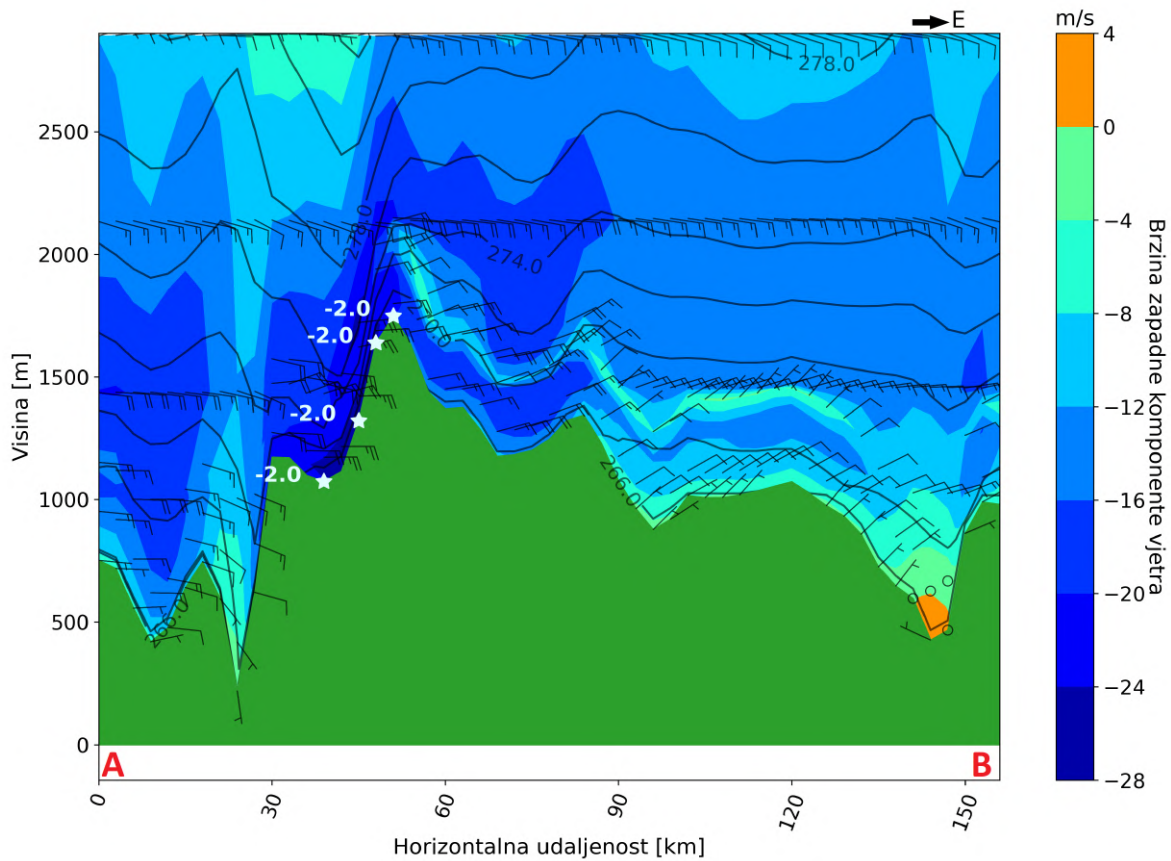
Kao prvi primjer, na slici 3.5 prikazan je slučaj od 16. 12. 2009. u 6 UTC kad se na domeni javlja dominantno hlađenje uzrokovano ZO-om. Ovdje je prikazan termin za koji je u poddomeni SE zabilježen najveći broj ZO-a. Iako je termin odabran tako da je najveći broj ZO-a u SE poddomeni, nacrtani su ZO-i za cijelu domenu. Vidljivo je kako je najveća koncentracija ZO-a u SE poddomeni – to će za ovaj slučaj biti područje fokusa. Vjetar je pretežito sjeveroistočnog smjera na kopnu te nema značajne količine oborine na prostoru koji je trenutno zanimljiv. Pažnju treba skrenuti na temperaturu koja vlada istočno od područja na kojem su zabilježeni padovi temperature uzrokovani ZO-om – relativno je niska u odnosu na zavjetrinu. U slučaju kad se uz tok vjetra nalazi toliko hladno područje, nameće se zaključak kako je u pitanju hladna advekcija. U navjetrini se nalazi zaliha hladnog zraka koju sinoptička situacija prisiljava na gibanje. Valja primijetiti kako je u Skagerraku (tjesnac između Danske, Švedske i Norveške) područje konvergencije vjetra, što je uzrok konvekcije i oborine iznad tog područja. Vertikalni presjek za navedeni termin prikazan je na slici 3.6. Vidljiva je izražena istočna komponenta strujanja (strujanje s istoka prema zapadu), a zapadna komponenta vjetra definirana je kao pozitivna – stoga su vrijednosti brzine na grafu negativne. Izentropne na prikazu spuštaju se niz zavjetrinu bez izraženog izentropskog povlačenja, jednako kao što je slučaj kod bure. Također, može se vidjeti hlađenje u zavjetrini. Stoga, prvi slučaj primjer je burskog vjetra.

### 3.6. *Dominantno grijanje*

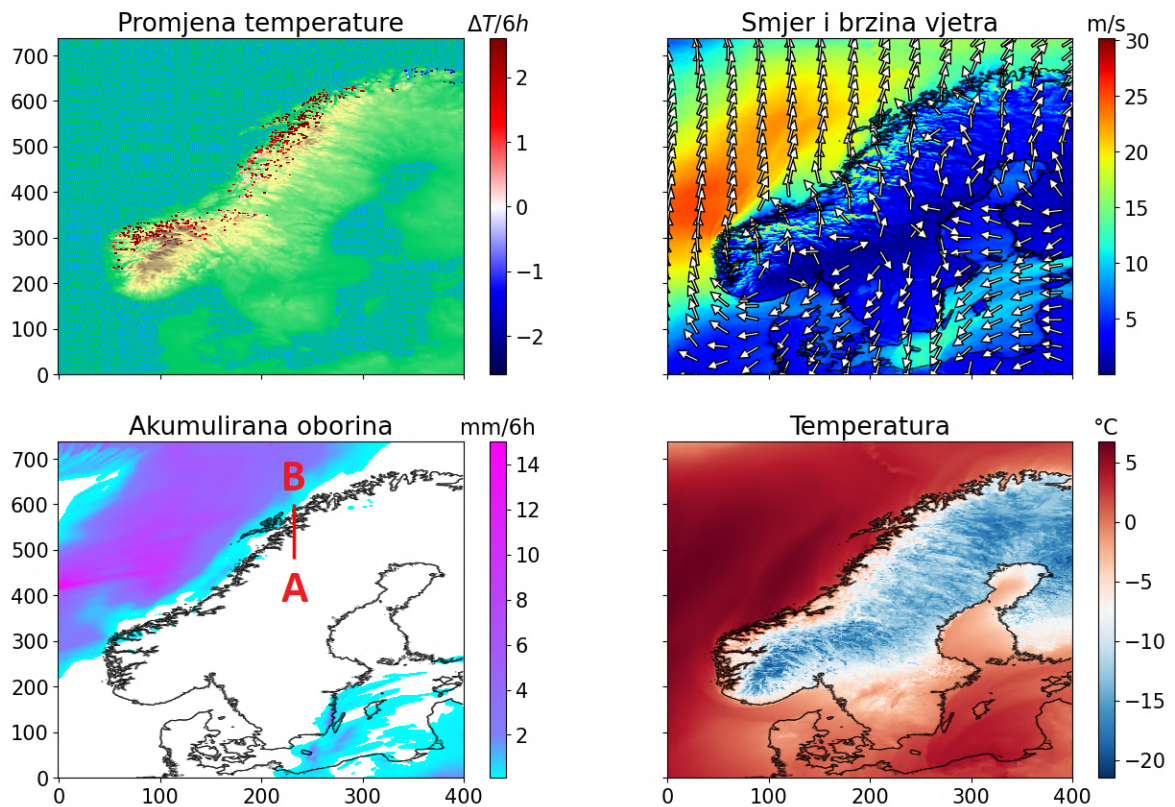
Drugi slučaj prikazuje dominantno zagrijavanje na domeni (slika 3.7) za 20. 1. 1998. u 12 UTC, kad je vladao CT 5. ZO-i su se javili i u sjevernim i u južnim Skandinavskim planinama. Smjer vjetra preko gorja pretežito je južni i jugoistočni. Oborina ne pospješuje zagrijavanje u ovom primjeru jer nastaje tek na pučini, nakon što vjetar prijeđe planinu, stoga ne valja tražiti uzrok grijanja u njoj. Nameće se pitanje zašto je došlo do toliko izraženog zagrijavanja. Prva mogućnost jest izentropsko povlačenje. Vertikalni presjek prikazan na slici 3.8 potvrđuje upravo to. Prikazana su dva termina,  $T - 1$  (6 h prije detekcije ZO-a) i  $T$  (termin kad su ZO-i detektirani). Dogodilo se spuštanje izentropa na cijelom području vertikalnog presjeka, a posebno povlačenje izentropa iznad  $\sim 90$  km na horizontalnoj osi grafa 3.8, gdje su detektirani ZO-i i snažno zagrijavanje, čak i do  $7$  °C.



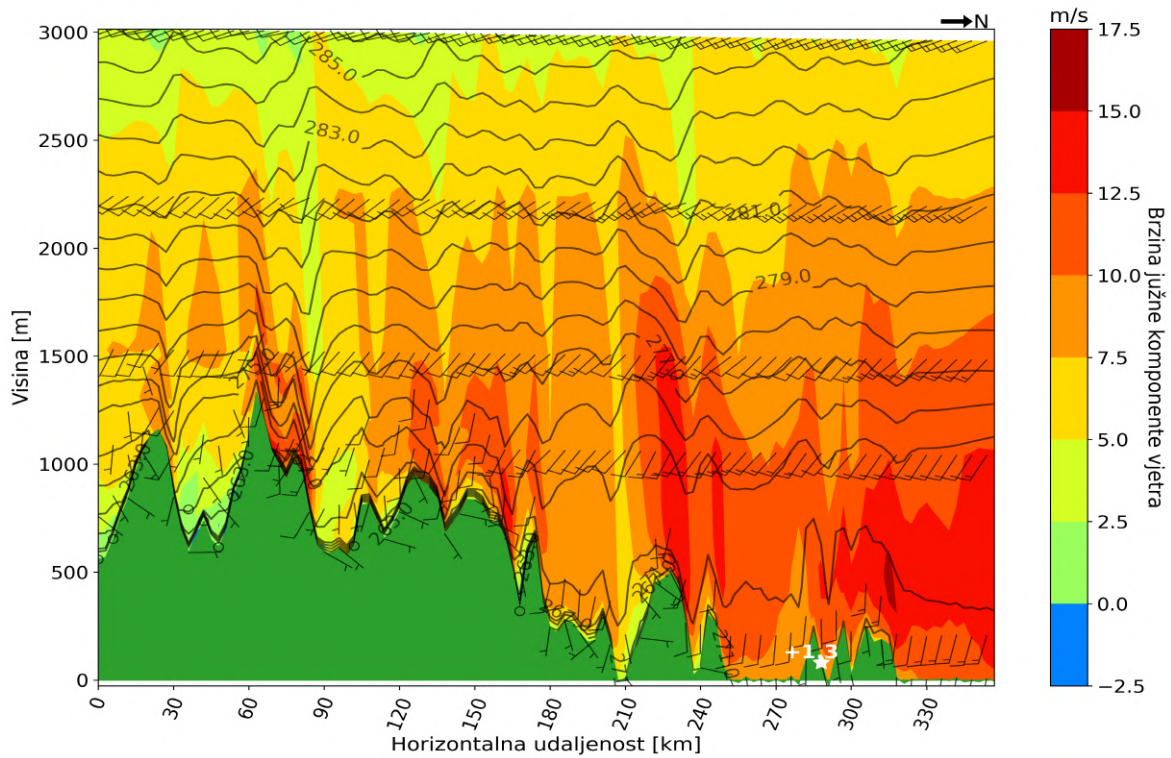
Slika 3.5. Termin s najvećim brojem ZO-a u SE poddomeni za CT 2 (16. 12. 2009., 6 UTC). Prikazani su orografija i lokacije i iznosi promjene temperature (gore lijevo), smjer (vektori) i brzina (boja) vjetra (gore desno), akumulirana 6-satna oborina (dolje lijevo) i temperatura na 2 m (dolje desno). Crvena linija na slici oborine pokazuje položaj vertikalnog presjeka prikazanog na slici 3.6.



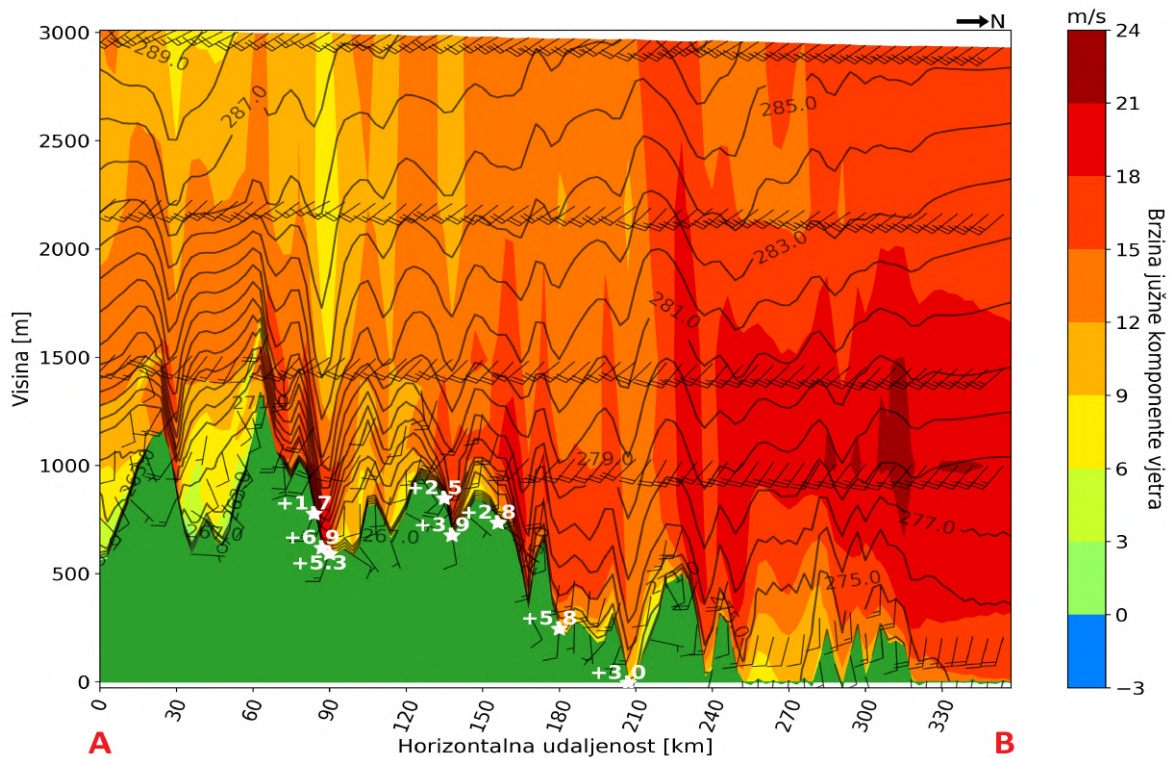
Slika 3.6. Termin s najvećim brojem ZO-a u SE poddomeni za CT 2 (16. 12. 2009., 6 UTC) – vertikalni presjek. Izentrope su prikazane kao pune crne linije, bijele zvijezde i brojke uz njih označavaju promjene temperature, zastave smjer i brzinu vjetra, a boja brzinu komponente vjetra okomitog na planinu (zapadnog).



Slika 3.7. Termin s najvećim brojem ZO-a u C poddomeni za CT 5 (20. 1. 1998., 12 UTC). Prikazani su orografija i lokacije i iznosi promjene temperature (gore lijevo), smjer (vektori) i brzina (boja) vjetra (gore desno), akumulirana 6-satna oborina (dolje lijevo) i temperatura na 2 m (dolje desno). Crvena linija na slici oborine pokazuje položaj vertikalnog presjeka prikazanog na slici 3.8



(a)



(b)

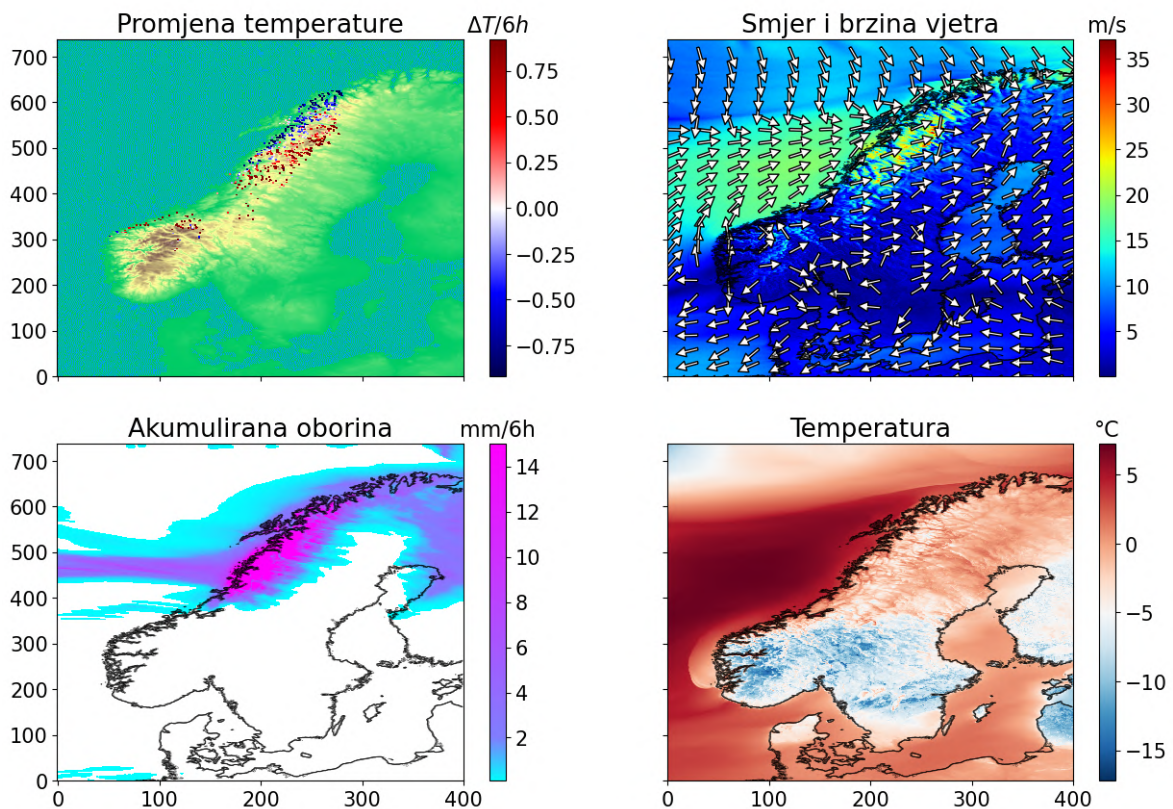
Slika 3.8. Termin s najvećim brojem ZO-a u C poddomeni za CT 5 – vertikalni presjek. Termin  $T - 1$  (a) i termin  $T$  (20. 1. 1998., 12 UTC) (b). Oznake A i B pokazuju orijentaciju vertikalnog presjeka sa slike 3.7. Bijele zvijezde i brojke uz njih označavaju promjenu temperature.



### 3.7. Podjela hlađenja i grijanja

#### 3.7.1. Oborina na sjeverozapadnoj obali

Nakon dva jednostavnija primjera što se tiče karaktera ZO-a, slijedi nešto kompliciraniji koji je zabilježen 25. 2. 2013. u ponoć po UTC-u. Na slici 3.9 prikazan je slučaj kad je područje na kojem se javljaju ZO-i vrlo pravilno odvojeno karakterom vjetra – sjeverozapadno su zahlađenja, a jugoistočno zatopljenja. Ovdje je vjetar pretežito jugozapadnog smjera. Vidljiva je konvergencija vjetra sa sjevera i s jugozapada, što rezultira oborinom. Kako zračna masa dolazi iznad kopna, oborina se intenzivira. Na samoj obali nema toliko visokog gorja te vjetar nema veliki doprinos od oslobođene latentne topline kao što ima istočnije, u višim planinama. Isto tako, zbog viših vrhova, lakše će se dogoditi i blokiranje toka. Sukladno navedenom, uz obalu se javlja zahlađenje hladnijim (nedovoljno zagrijanim) zrakom, a prema unutrašnjosti prorade mehanizmi grijanja zraka, u prvom redu zagrijavanje latentnom toplinom i oborinom.



Slika 3.9. Termin s najvećim brojem ZO-a u C poddomeni za CT 1 (25. 2. 2013., 0 UTC). Prikazani su orografija i lokacije i iznosi promjene temperature (gore lijevo), smjer (vektori) i brzina (boja) vjetra (gore desno), akumulirana 6-satna oborina (dolje lijevo) i temperatura na 2 m (dolje desno).

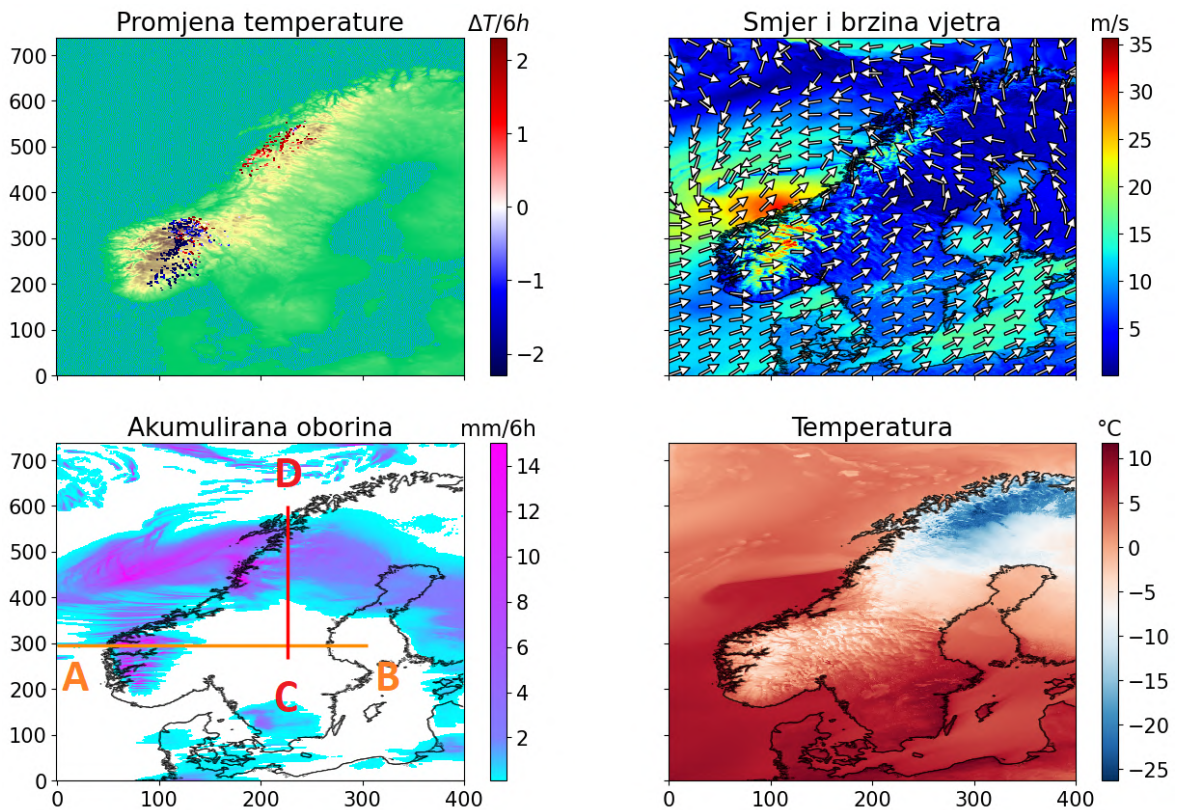
### 3.7.2. *Prolazak tople fronte*

Sljedeći primjer prikazuje dva odvojena područja javljanja ZO-a, jedno u južnom Skandinavskom gorju, gdje je dominantno hlađenje, a drugo u sjevernom, gdje je dominantno grijanje (slika 3.10). Navedena situacija zbila se 9. 1. 2005. u 18 UTC. Po strujanju zraka može se vidjeti kako se u konkretnom slučaju ciklona nalazi tik do obale Skandinavije nad Atlantikom. Na prikazu oborine vidi se oborinska pruga od centra ciklone preko Skandinavskog poluotoka prema jugoistoku te je prva ideja bila da je povezana s frontom. Pogledom na vertikalni presjek (slika 3.11), prema nagnutosti izentropa može se zaključiti kako se radi o toploj fronti. Iako je u SW poddomeni primijećena oborina, ona očito nije bila dovoljna da zagrije tok zraka koji je u SE poddomeni uzrokovao ZO-e. U južnom dijelu Skandinavskog gorja već pristiže hladna fronta, vidljiva na vertikalnom presjeku na slici 3.12. Dolaskom hladnog zraka, taj zrak biva prebačen preko planine i posljedično se detektiraju ZO-i koji u pravilu hlade zavjetrinu. U prikazanoj situaciji mogu se vidjeti i porasti temperature u dolinama koji mogu biti rezultat toga da termin prije na tom području nije bilo vjetra. U situaciji bez vjetra u siječnju, područje se može efikasno ohladiti. Iako zapuše hladan vjetar, on je relativno topliji od prethodno ohlađene okoline te se detektiraju porasti temperature.

Uz ovdje prikazane slike, u dodatku A nalaze se slike koje prikazuju prolazak tople fronte domenom u terminima koji prethode ovdje prikazanom trenutku. Tamo se može vidjeti kako topla fronta dolaskom do južnog Skandinavskog gorja u  $T - 2$  uzrokuje velik broj ZO-a s izraženim porastima temperature (slika A2). Vertikalni presjeci prolazeće tople fronte na sjevernom dijelu Skandinavskog poluotoka prikazane su na slikama A4, A5 i A6, a na južnom dijelu na slikama A7, A8 i A9. Kako topla fronta odmiče na sjever, tako se i porasti temperature uzrokovani ZO-om kreću prema sjeveru, očita je povezanost tople fronte i porasta temperature, što je i očekivano. Na slici A8 vidljivo je javljanje vjetra uz orografiju usmjerenog suprotno prevladavajućem strujanju. Razlog tome leži u približavanju toplog sektora, s kojim se povezuje niži tlak zraka. Tada razlika tlaka između hladnijeg područja ispred fronte i toplijeg iza nje može potaknuti vjetar na gibanje prema toplom sektoru. U terminu  $T$  u južnom se dijelu približava hladna fronta koja donosi hladan zrak, što onda uzrokuje i već spomenuti pad temperature.

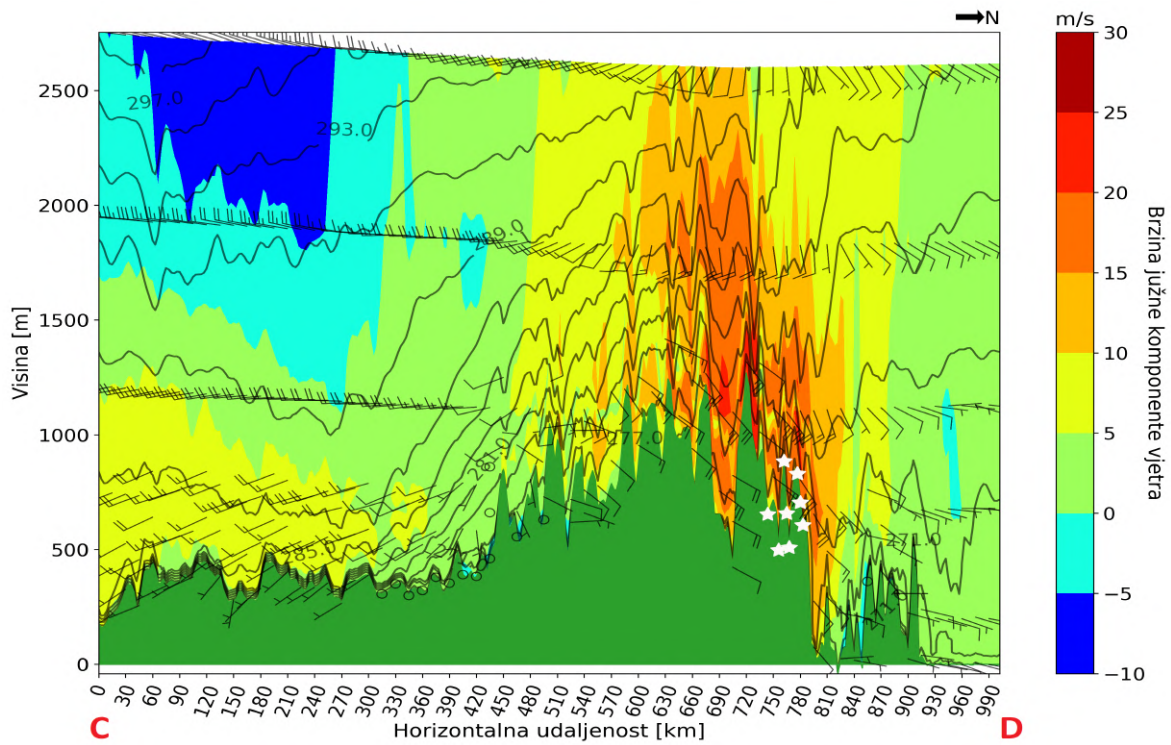
### 3.8. *Neppravilna struktura zagrijavanja i hlađenja*

Mnoge situacije slične su sljedećoj, prikazanoj na slici 3.13, ili su situacije čak i kompliciranije od ove, u smislu da su grijanje i hlađenje potpuno "izmiješani". Ovdje je izdvojen primjer od 31. 1. 2013. u 18 UTC, za CT 2, kad je najveći broj ZO-a u centralnoj poddomeni. Prikazana je situacija na cijeloj domeni te je na slici 3.13b uvećana. Na slici 3.13b vidljivo je kako se južnije javlja hladni ZO, a niz tok, sjevernije, topli (ZO zagrijava). Za taj slučaj napravljen je vertikalni presjek u  $T - 1$  i  $T$  (slika 3.14) na kojem se na horizontalnoj osi na  $\sim 50$  km vidi izdizanje izentropa, što znači hlađenje. Također se na istoj lokaciji u dolini može primijetiti suprotan smjer vjetra i blokiranje toka. Nadalje, vidi se i da je došlo do blagog izentropskog povlačenja na  $\sim 150$  km na horizontalnoj osi, koje je, uz moguće dodatne mehanizme, bilo dovoljno za zagrijavanje veće od  $2$  °C. Na vertikalnom presjeku u navjetrini vidi se pri vrhu planine hlađenje,

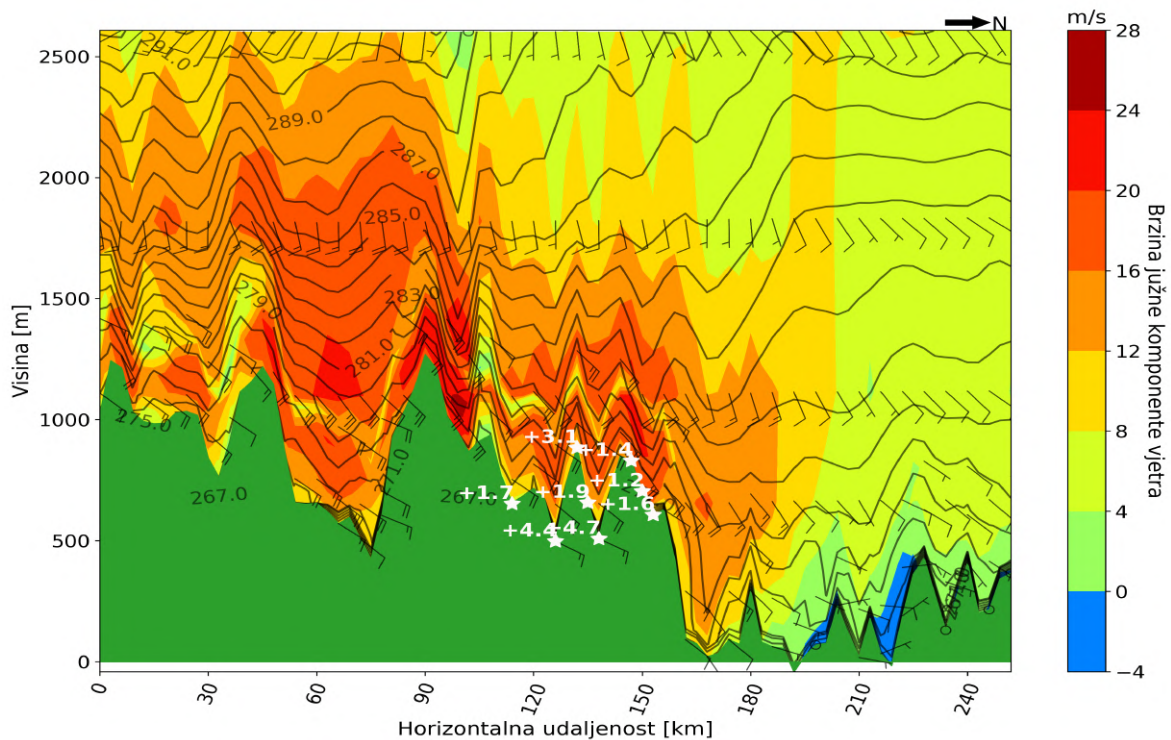


Slika 3.10. Termin s najvećim brojem ZO-a u SE poddomeni za CT 3 (9. 1. 2005., 18 UTC). Prikazani su orografija i lokacije i iznosi promjene temperature (gore lijevo), smjer (vektori) i brzina (boja) vjetra (gore desno), akumulirana 6-satna oborina (dolje lijevo) i temperatura na 2 m (dolje desno). Na slici dolje lijevo crvena i narančasta linija pokazuju lokacije vertikalnih presjeka prikazanih na slikama 3.11 i 3.12, redom.

izentropne su jako zbijene te je vjetar vrlo brz (crveno na slici). Može se primijetiti skok izentropa pred manjim vrhom (na  $\sim 140$  km na horizontalnoj osi) iza kojeg se vjetar niz padinu ubrzava. No, zagrijavanje se ne detektira u području najvećih brzina, što se slaže s prije navedenim istraživanjima kako su zagrijavanja zabilježena češće u rubnim područjima mlaza ZO-a (Elvidge i Renfrew, 2016).

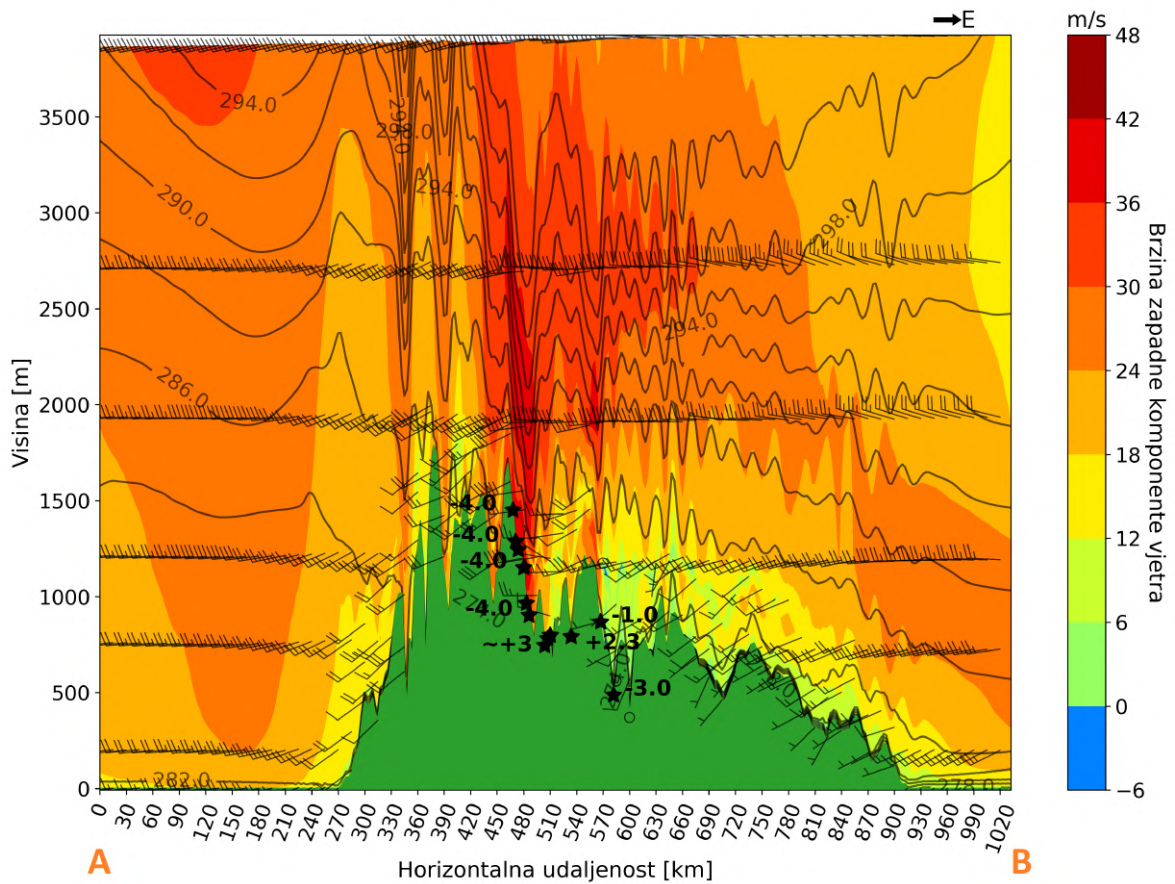


(a)

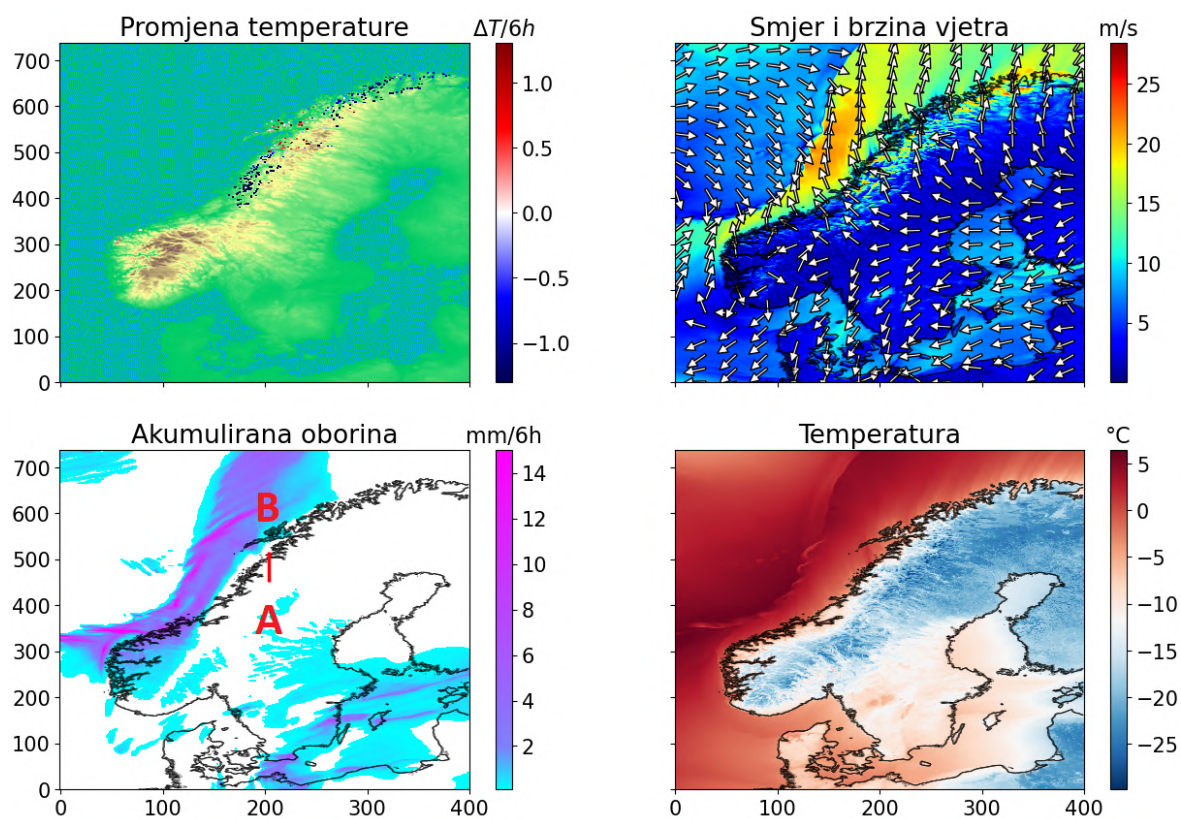


(b)

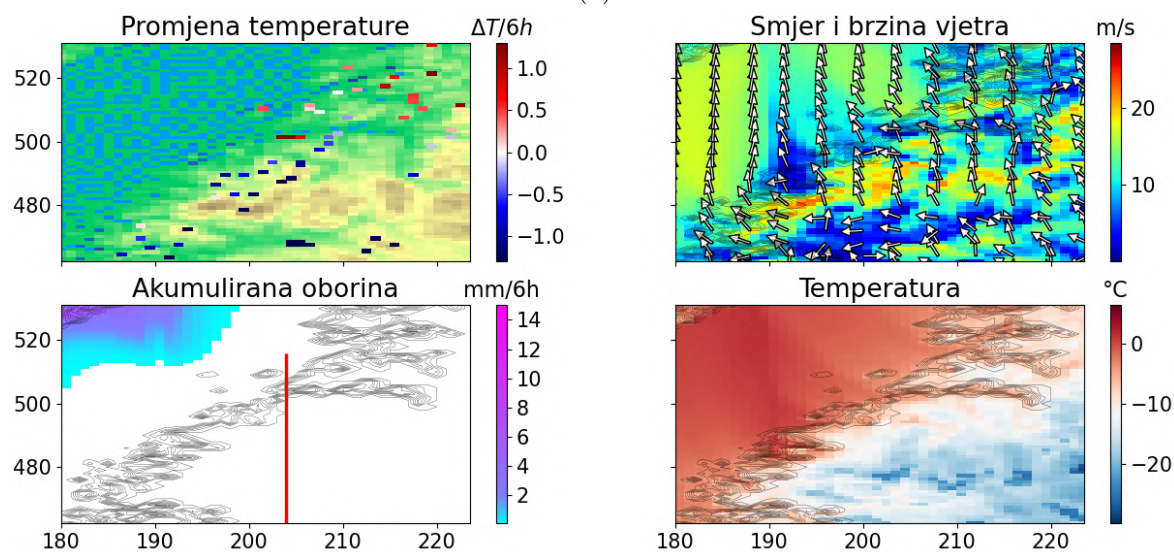
Slika 3.11. Termin s najvećim brojem ZO-a u SE poddomeni za CT 3 (9. 1. 2005., 18 UTC) – vertikalni presjek označen na slici 3.10 crvenom linijom. Na (a) se vidi nagnutost izentropa tipična za toplu frontu. (b) uvećano područje gdje se javljaju ZO-i (odgovara 630 - 880 km na (a)). Bijele zvijezde pokazuju lokacije ZO-a, a brojke uz njih iznose promjene temperature.



Slika 3.12. Termin s najvećim brojem ZO-a u SE poddomeni za CT 3 (9. 1. 2005., 18 UTC) – vertikalni presjek označen na slici 3.10 narančastom linijom. Crne zvijezde pokazuju lokacije ZO-a, a brojke uz njih iznose promjene temperature.

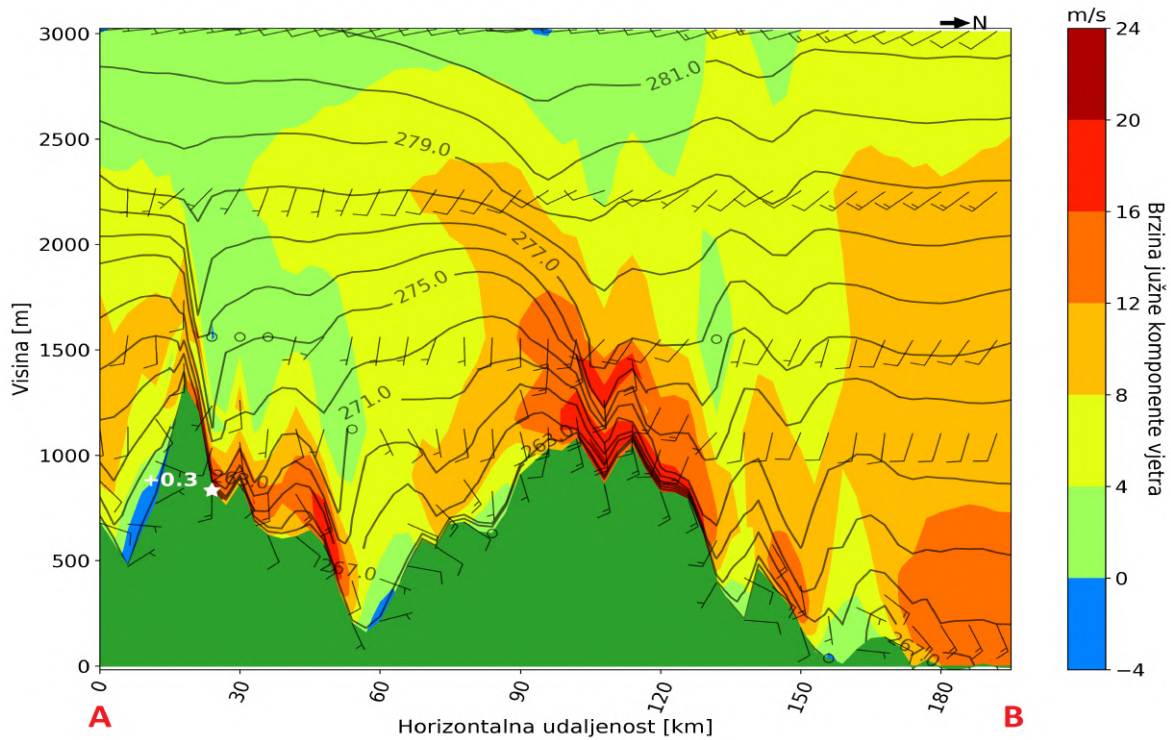


(a)

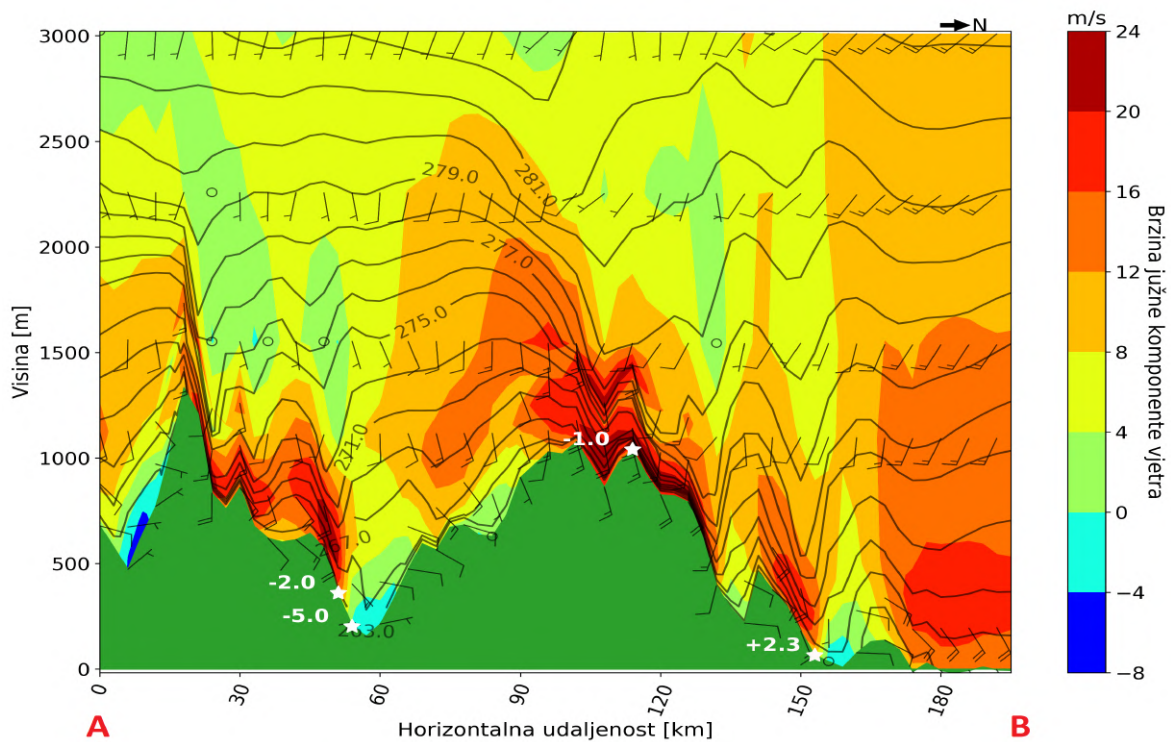


(b)

Slika 3.13. Termin s najvećim brojem ZO-a u C poddomeni za CT 2 (31. 1. 2013., 18 UTC). (a) cijela domena, (b) fokusirano na područje od interesa. Prikazani su orografija i lokacije i iznosi promjene temperature (gore lijevo), smjer (vektori) i brzina (boja) vjetra (gore desno), akumulirana 6-satna oborina (dolje lijevo; sive boje prikazuju granicu kopno-more) i temperatura na 2 m (dolje desno) – vrijedi za (a) i (b). Na prikazu oborine nalazi se i crvena vertikalna linija koja pokazuje lokaciju vertikalnog presjeka prikazanog na slici 3.14.



(a)



(b)

Slika 3.14. Vertikalni presjek atmosfere za slučaj maksimalnog broja ZO-a u C poddomeni i za trajanja CT 2. Crne pune linije su izentropi, boje predstavljaju brzinu južne komponente vjetra. Zeleno je orografija, a bijele oznake zvijezde i brojke uz njih pokazuju promjenu temperature. Vertikalni presjek u terminu  $T - 1$  nalazi se na slici (a), a u  $T$  (31. 1. 2013., 18 UTC) na slici (b).

## 4. Zaključak

Razmatrani su podaci dobiveni provedbom projekta NorCP koristeći numerički meteorološki model AROME koji je bio ugniježđen u mrežu modela ALADIN, a rubni uvjeti uzeti su iz ERA-Interim reanalize. Simulacije su pokrile 20 godina, 1998. – 2017., i razmatrani su rezultati na području Skandinavskog poluotoka, odnosno Skandinavskog gorja.

Apsolutno najveći broj zavjetrinskih oluja javlja se u zimskoj (DJF) sezoni, stoga su detaljniji rezultati prikazani upravo za DJF sezonu. Svaki dan zimske sezone u razmatranom razdoblju svrstan je u jedan od 10 cirkulacijskih tipova te je tražena povezanost sinoptičke situacije i zavjetrinskih oluja.

Domena je podijeljena na četiri poddomene te je apsolutno najveći broj zavjetrinskih oluja detektiran u centralnoj poddomeni. Zbog nižeg gorja u tom dijelu domene, vjetar lakše prelazi orografiju te se javlja efekt kanaliziranja strujanja. Najveći broj zavjetrinskih oluja uzrokuje cirkulacijski tip 10 (vidi sliku 2.4), no on se i najrjeđe javlja. Razmotreni su neki od cirkulacijskih tipova i povezani s brojem zavjetrinskih oluja koje uzrokuju te smjerom njihovog puhanja. Najčešći smjerovi puhanja zavjetrinskih oluja su južni i jugoistočni (dakle, pušu k sjveru i sjeverozapadu). Razlikuje se samo poddomena SE, na kojoj je zbog njezine definicije (na istočnoj strani gorja) najčešći smjer u rasponu od zapadnog do južnog, no postoje odstupanja za pojedine cirkulacijske tipove.

Istraživale su se promjene temperature izazvane zavjetrinskim olujama. Unatoč očekivanjima kako će postojati povezanost karaktera zavjetrinske oluje (zagrijavanje ili hlađenje) s cirkulacijskim tipovima, ona nije nađena na ovoj razini istraživanja. Raspodjele promjene temperature za sve poddomene i cirkulacijske tipove pozicionirane su oko nule, uz male varijacije. To znači da se za trajanja svakog cirkulacijskog tipa mogu javiti zavjetrinske oluje koje zagrijavaju i one koje hlade. Također, dvoznamenkaste promjene temperature ekstremne su pojave. Kako bi se stekao dojam iz kojeg razloga su raspodjele upravo takve kakve jesu, pristupa se analizi pojedinih termina koji su rezultirali najvećim brojem zavjetrinskih oluja.

Prikazano je pet različitih termina koji su diskutirani. Za prvi, dominantno hlađenje u južnim planinama, pokazalo se kako vjetar dolazi s hladnijeg dijela kopna te je vrlo sličan buri. Za slučaj kad na domeni dominira grijanje, uključuju se mehanizmi zagrijavanja zraka te je vjetar fenskog karaktera. Vidljivo je povlačenje izentropa, a i drugi doprinosi mogu biti uključeni (npr. turbulentno miješanje). Analiziran je i slučaj zagrijavanja fena oslobađanjem latentne topline i oborinom, u kojem su područja zagrijavanja i hlađenja podosta pravilno odvojena, a razlog tome može biti različita visini orografije. Pojedina zagrijavanja mogu se dogoditi i hladnijim vjetrom, ako je on relativno topao u odnosu na područje u koje puše. Razmotrena je i situacija prolaska tople fronte poluotokom te je povezana pojavnost toplih zavjetrinskih oluja i tople fronte. Na kraju, prikazan je termin u kojem su zagrijavanje i hlađenje heterogeno raspodijeljeni po domeni.



Kao što je vidljivo iz nekoliko obrađenih konkretnih slučajeva, situacije mogu biti vrlo raznolike i za iste CT-e te na istim poddomenama. Nameće se zaključak kako je situacija izuzetno kompleksna. Ne mogu se izvoditi zaključci i pravilnosti iz same sinoptičke situacije, već ključnu ulogu ima interakcija orografije i nametnutog strujanja. Kao što je vidljivo, čak i za jedan izdvojen termin javlja se i zagrijavanje i hlađenje na istoj domeni, što ukazuje na problematiku pri pokušaju izvođenja klimatologije.

Ovaj rad pokazao je kompleksnost i izazove razmatranja lokalnih vjetrova na području Skandinavije te da postoji potreba za daljnjim i novim istraživanjima. Glavni razlog je složenost orografije te bi svakako bilo dobro provesti veći broj eksperimenata i istražiti problematiku iz raznih kutova. Skandinavski poluotok površinom je vrlo velik, zato su u istraživanju uvedene poddomene. Međutim, bilo bi dobro na temelju iskustva tamošnjih znanstvenika pokušati podijeliti poluotok na fizikalno slične poddomene baš u svrhu istraživanja zavjetrinskih oluja. Također, postoji prostor i za analizu zavjetrinskih oluja u budućnosti te kako će se situacija mijenjati s obzirom na klimatske scenarije.

## Literatura

- Abatzoglou, J. T., B. J. Hatchett, P. Fox-Hughes, A. Gershunov, i N. J. Nauslar (2021). Global climatology of synoptically-forced downslope winds. *International Journal of Climatology* 41, 31–50.
- Baines, P. G. (1995). *Topographic effects in stratified flows*. Cambridge university press, pp. 482.
- Belušić, D., H. D. Vries, A. Dobler, O. Landgren, P. Lind, D. Lindstedt, R. A. Pederesen, J. C. Sánchez-Perrino, E. Toivonen, B. V. Ulft, F. Wang, U. Andrae, Y. Batrak, E. Kjellström, G. Lenderink, G. Nikulin, J. P. Pietikäinen, E. Rodríguez-Camino, P. Samuelsson, E. V. Meijgaard, i M. Wu (2020). HCLIM38: A flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection-permitting scales. *Geoscientific Model Development* 13, 1311–1333.
- Bengtsson, L., U. Andrae, T. Aspelien, Y. Batrak, J. Calvo, W. de Rooy, E. Gleeson, B. Hansen-Sass, M. Homleid, M. Hortal, K.-I. Ivarsson, G. Lenderink, S. Niemelä, K. P. Nielsen, J. Onvlee, L. Rontu, P. Samuelsson, D. S. Muñoz, A. Subias, S. Tijn, V. Toll, X. Yang, i M. Ødegaard Køltzow (2017). The HARMONIE–AROME model configuration in the ALADIN–HIRLAM NWP system. *Monthly Weather Review* 145, 1919–1935.
- Cao, Y. i R. G. Fovell (2016). Downslope windstorms of San Diego county. Part I: A case study. *Monthly Weather Review* 144, 529–552.
- De Wekker, S. F. J. i C. D. Whiteman (2006). On the time scale of nocturnal boundary layer cooling in valleys and basins and over plains. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45, 813–820.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balsaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut, i F. Vitart (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, 553–597.
- Doyle, J. D. i D. R. Durran (2002). The dynamics of mountain-wave-induced rotors. *Journal of the Atmospheric Sciences* 59, 186–201.
- Doyle, J. D. i M. A. Shapiro (2000). A multi-scale simulation of an extreme downslope windstorm over complex topography. *Meteorology and Atmospheric Physics* 74, 83–101.
- Durran, D. R. (2003). Downslope winds. *Encyclopedia of atmospheric sciences* 644, 650.
- Egger, J. (1990). Thermally Forced Flows: Theory. In *Atmospheric Processes over Complex Terrain*, pp. 43–58. American Meteorological Society.

- Elvidge, A. D. i I. A. Renfrew (2016). The causes of foehn warming in the lee of mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97, 455–466.
- Enger, L. i B. Grisogono (1998). The response of bora-type flow to sea surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 124 (548), 1227–1244.
- Gaffin, D. M. (2009). On high winds and foehn warming associated with mountain-wave events in the western foothills of the southern Appalachian Mountains. *Weather and Forecasting* 24, 53–75.
- Grisogono, B. i D. Belušić (2009). A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora wind. vol. 61. *Tellus A*, 1600–0870.
- Grønås, S. (1997). Mesoscale phenomena induced by mountains over Scandinavia and Spitsbergen. In *Proceedings of the Workshop on Orography*, pp. 165–182. ECMWF.
- Grubišić, V. i M. Orlić (2007). Early observations of rotor clouds by Andrija Mohorovičić. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88, 693–700.
- Grønås, S. i A. D. Sandvik (1999). Numerical simulations of local winds over steep orography in the storm over north Norway on October 12, 1996. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 104, 9107–9120.
- Hansen, F. i D. Belušić (2021). Tailoring circulation type classification outcomes. *International Journal of Climatology* 41, 6145–6161.
- Harstveit, D. K., L. Andresen, i K. H. Midtbø (1995). Downslope windstorms at Oppdal, Norway: Local description and numerical simulations, DNMI report no. 23/95 Klima.
- Holton, J. R. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Volume 88. San Diego, USA: Academic Press, pp. 535.
- Kartsios, S., T. Karacostas, I. Pytharoulis, i A. P. Dimitrakopoulos (2021). Numerical investigation of atmosphere-fire interactions during high-impact wildland fire events in Greece. *Atmospheric Research* 247, 105253.
- Klemp, J. B. i D. R. Durran (1987). Numerical modelling of Bora winds. *Meteorology and Atmospheric Physics* 36, 215–227.
- Kozmar, H. i B. Grisogono (2021). Characteristics of downslope wind storms in the view of the typical atmospheric boundary layer. In *The Oxford Handbook of Non-Synoptic Wind Storms*, pp. 84 – 114. Oxford University Press.
- Lind, P., D. Belušić, O. B. Christensen, A. Dobler, E. Kjellström, O. Landgren, D. Lindstedt, D. Matte, R. A. Pedersen, E. Toivonen, i F. Wang (2020). Benefits and added value of convection-permitting climate modeling over Fenno-Scandinavia. *Climate Dynamics* 55, 1893–1912.
- Lindstedt, D., P. Lind, E. Kjellström, i C. Jones (2015). A new regional climate model operating at the meso-gamma scale: performance over Europe. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 67, 24138.

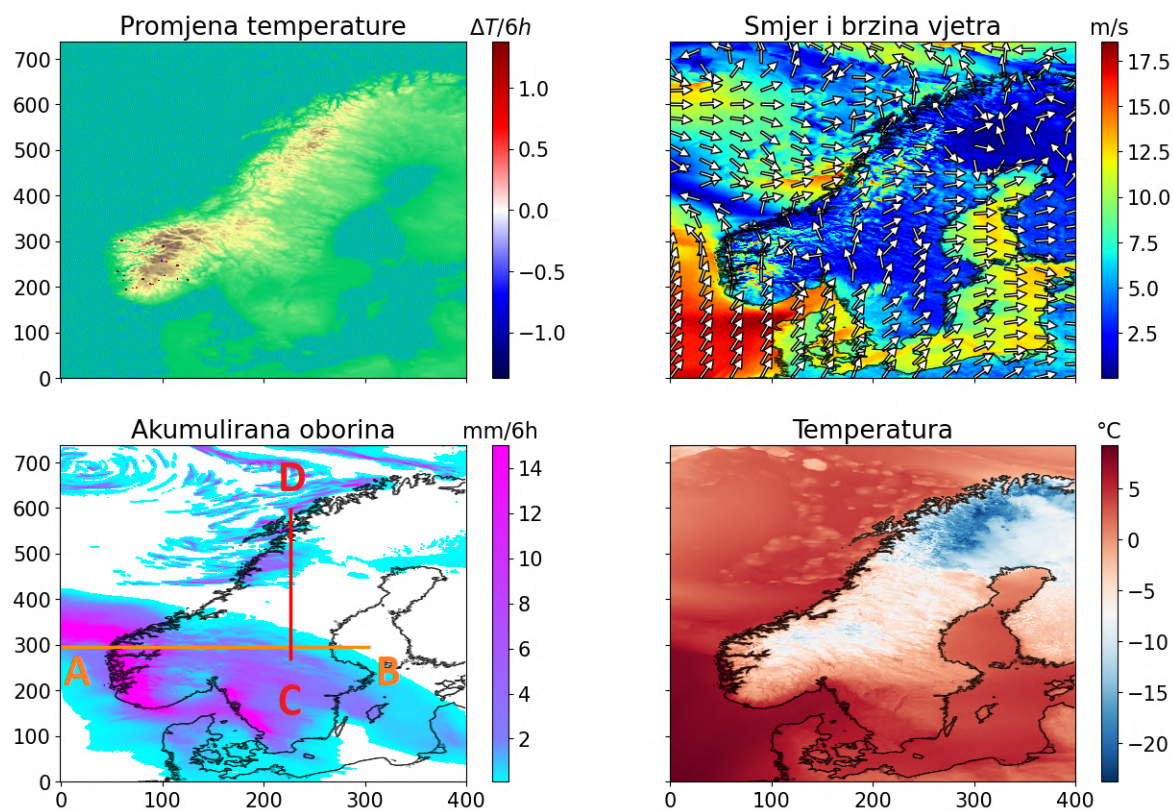
- Lund, I. A. (1963). Map-pattern classification by statistical methods. *Journal of Applied Meteorology* 2, 56–65.
- Markowski, P. i Y. Richardson (2011). *Mesoscale meteorology in midlatitudes*, Volume 2. John Wiley & Sons, pp. 432.
- Matte, D., R. Laprise, J. M. Thériault, i P. Lucas-Picher (2017). Spatial spin-up of fine scales in a regional climate model simulation driven by low-resolution boundary conditions. *Climate Dynamics* 49, 563–574.
- Médus, E., E. D. Thomassen, D. Belušić, P. Lind, P. Berg, J. H. Christensen, O. B. Christensen, A. Dobler, E. Kjellström, J. Olsson, i W. Yang (2022). Characteristics of precipitation extremes over the Nordic region: added value of convection-permitting modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22(3), 693–711.
- Miller, P. P. i D. R. Durran (1991). On the sensitivity of downslope windstorms to the asymmetry of the mountain profile. *Journal of the Atmospheric Sciences* 48, 1457–1473.
- Mohorovičić, A. (1889). Interessante Wolkenbildung über der Bucht von Buccari. *Meteor. Z* 24, 56–58.
- Moussiopoulos, N. (1994). *The EUMAC Zooming Model: Model Structure and Applications*. Germany, Garmisch-Partenkirchen: EUROTRAC International Scientific Secretariat, pp. 266.
- Moussiopoulos, N. (1995). The EUMAC Zooming model: A tool for local-to-regional air quality studies. *Meteorology and Atmospheric Physics* 57, 115–133.
- Nauslar, N. J., J. T. Abatzoglou, i P. T. Marsh (2018). The 2017 North bay and southern California fires: A case study. *Fire* 1(1).
- Philipp, A., P. M. Della-Marta, J. Jacobeit, D. R. Fereday, P. D. Jones, A. Moberg, i H. Wanner (2007). Long-term variability of daily north Atlantic–European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate* 20, 4065–4095.
- Richner, H. i P. Hächler (2013). Understanding and forecasting Alpine foehn. In *Mountain weather research and forecasting*, pp. 219–260. Springer.
- Romanić, D. (2019). Local winds of Balkan peninsula. *International Journal of Climatology* 39, 1–17.
- Romanić, D., A. Rasouli, i H. Hangan (2015). Wind resource assessment in complex urban environment. *Wind Engineering* 39, 193–212.
- Sandvik, N. M. I. A. i K. Harstveit (2005). Study of a downslope windstorm over southern Norway, Rjukan, 16. January 2000, MET Norway report no. 18/2005.
- Seibert, P. (1990). South foehn studies since the ALPEX experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics* 43, 91–103.
- Smith, R. B. (1985). On severe downslope winds. *Journal of the Atmospheric Sciences* 42, 2597–2603.

- Smith, R. B. (1987). Aerial observations of the Yugoslavian Bora. *Journal of the Atmospheric Sciences* 44, 269–297.
- Termonia, P., C. Fischer, E. Bazile, F. Bouyssel, R. Brožková, P. Bénard, B. Bocnenek, D. Degrauwe, M. Derková, R. E. Khatib, R. Hamdi, J. Mašek, P. Pottier, N. Pristov, Y. Seity, P. Smolíková, O. Španiel, M. Tudor, Y. Wang, C. Wittmann, i A. Joly (2018). The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development* 11, 257–281.
- Čavlina Tomašević, I., K. K. W. Cheung, V. Vučetić, P. Fox-Hughes, K. Horvath, M. Telišman Prtenjak, P. J. Beggs, B. Malečić, i V. Milić (2022). The 2017 Split wildfire in Croatia: Evolution and the role of meteorological conditions. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* 2022, 1–48.
- Vosper, S. (2004). Inversion effects on mountain lee waves. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 130, 1723–1748.

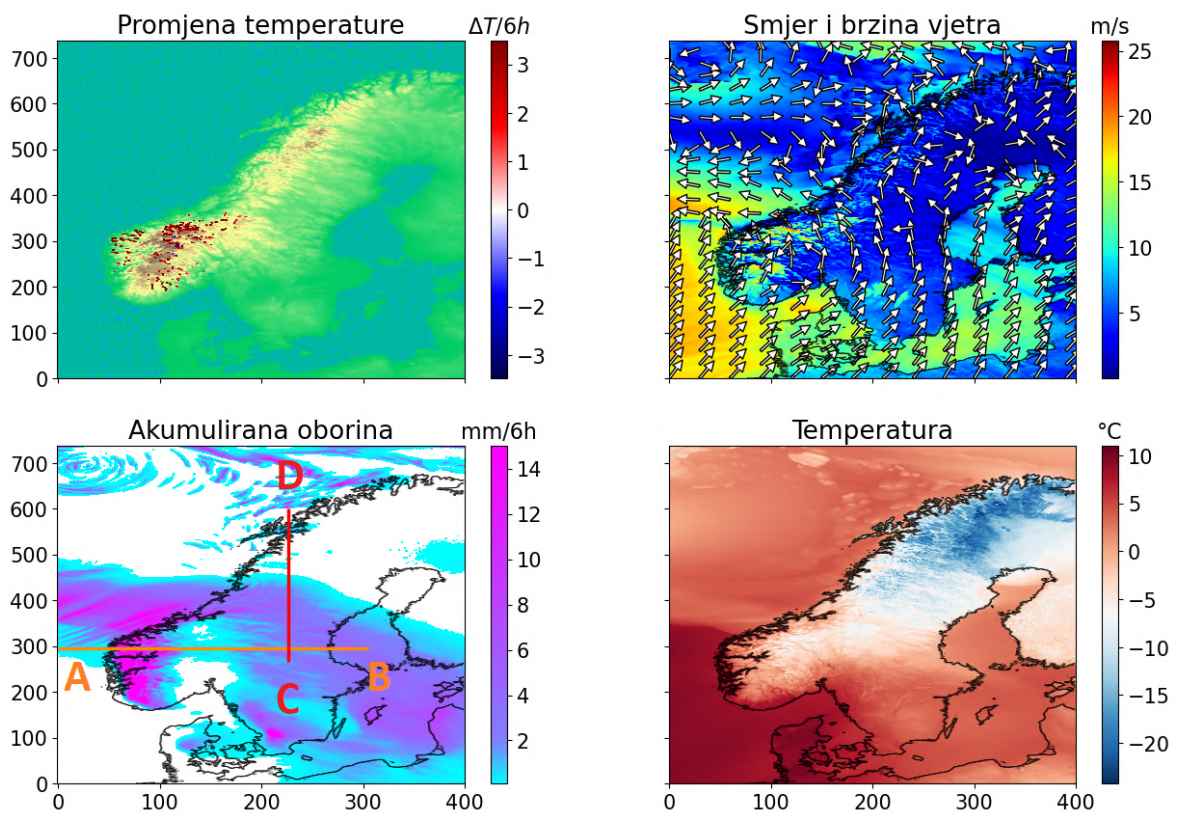
## Popis kratica

ACCORD	engl. <i>A Consortium for Convection-scale Modelling, Research and Development</i>
ALADIN	franc. <i>Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International</i>
AROME	engl. <i>Applications of Research to Operations at Mesoscale</i>
C	centralna poddomena
CPRCM	regionalni klimatski model koji razaznaje duboku konvekciju engl. <i>Convection Permitting Regional Climate Model</i>
CT	cirkulacijski tip
DJF	prosinač, siječanj, veljača (engl. <i>December, January, February</i> )
GCM	globalni klimatski model (engl. <i>global climate model</i> )
HARMONIE	engl. <i>HIRLAM-ALADIN Research on Mesoscale Operational NWP in Euromed</i>
HCLIM	HARMONIE-Climate
HIRLAM	engl. <i>High Resolution Limited Area Model</i>
JJA	lipanj, srpanj, kolovoz (engl. <i>June, July, August</i> )
MAM	ožujak, travanj, svibanj (engl. <i>March, April, May</i> )
MSLP	srednji tlak na razini mora (engl. <i>mean sea-level pressure</i> )
MEMO	mezoskalni model
N	sjever (engl. <i>north</i> )
NorCP	projekt engl. <i>Nordic Convection Permitting Climate Projections</i>
NWP	engl. <i>Numerical Weather Prediction</i>
S	jug (engl. <i>south</i> )
SE	jugoistok (engl. <i>southeast</i> )
SON	rujan, listopad, studeni (engl. <i>September, October, November</i> )
SW	jugozapad (engl. <i>southwest</i> )
$T$	termin u kojem je zabilježen maksimalan broj zavjetrinskih oluja
$T - 1$	termin 6 h prije termina u kojem je zabilježen maksimalan broj zavjetrinskih oluja
$T - 2$	termin 12 h prije termina u kojem je zabilježen maksimalan broj zavjetrinskih oluja
$T - 3$	termin 18 h prije termina u kojem je zabilježen maksimalan broj zavjetrinskih oluja
ZO	zavjetrinska oluja
$\Theta$	potencijalna temperatura

## Dodatak A Prolazak tople fronte

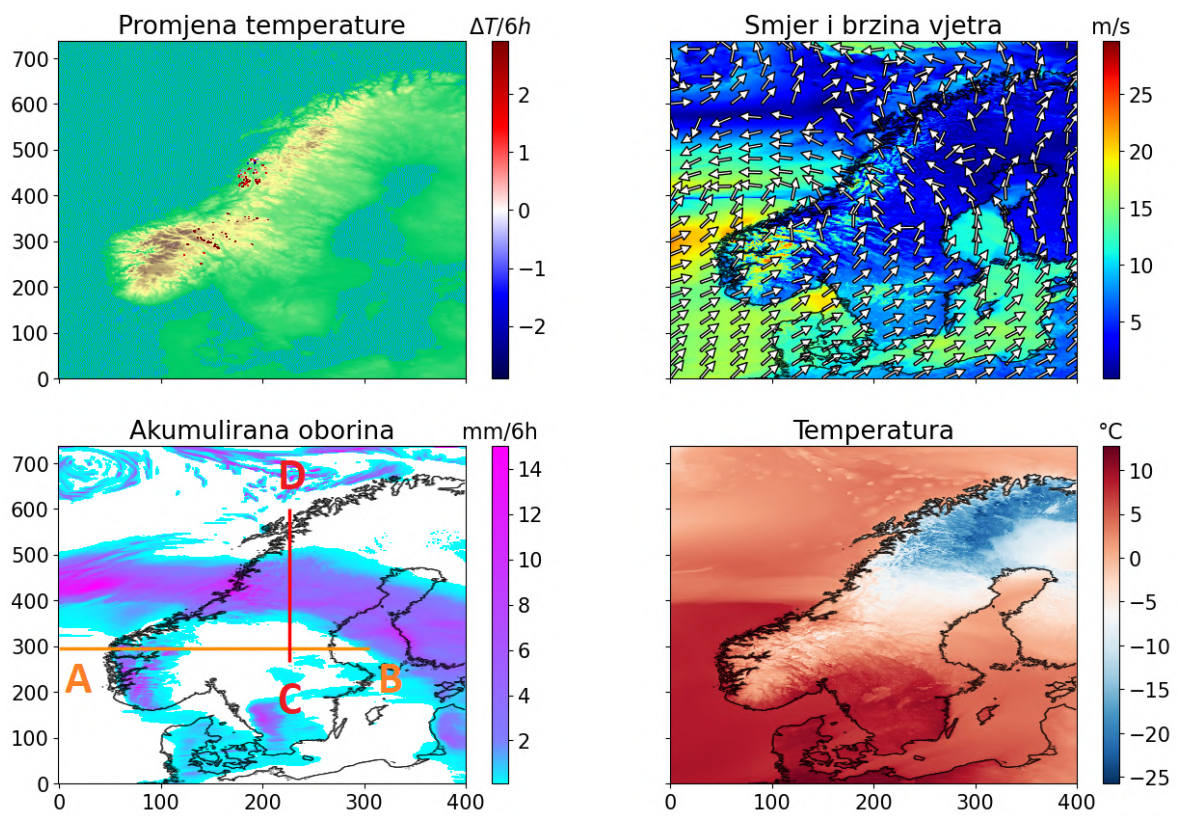


Slika A1.  $T - 3$  (9. 1. 2005., 0 UTC) u SE poddomeni za CT 3. Prikazani su orografija i lokacije i iznosi promjene temperature (gore lijevo), smjer (vektori) i brzina (boja) vjetra (gore desno), akumulirana 6-satna oborina (dolje lijevo) i temperatura na 2 m (dolje desno). Na slici dolje lijevo crvena i narančasta linija pokazuju lokacije vertikalnih presjeka prikazanih na slikama A4 i A7, redom.

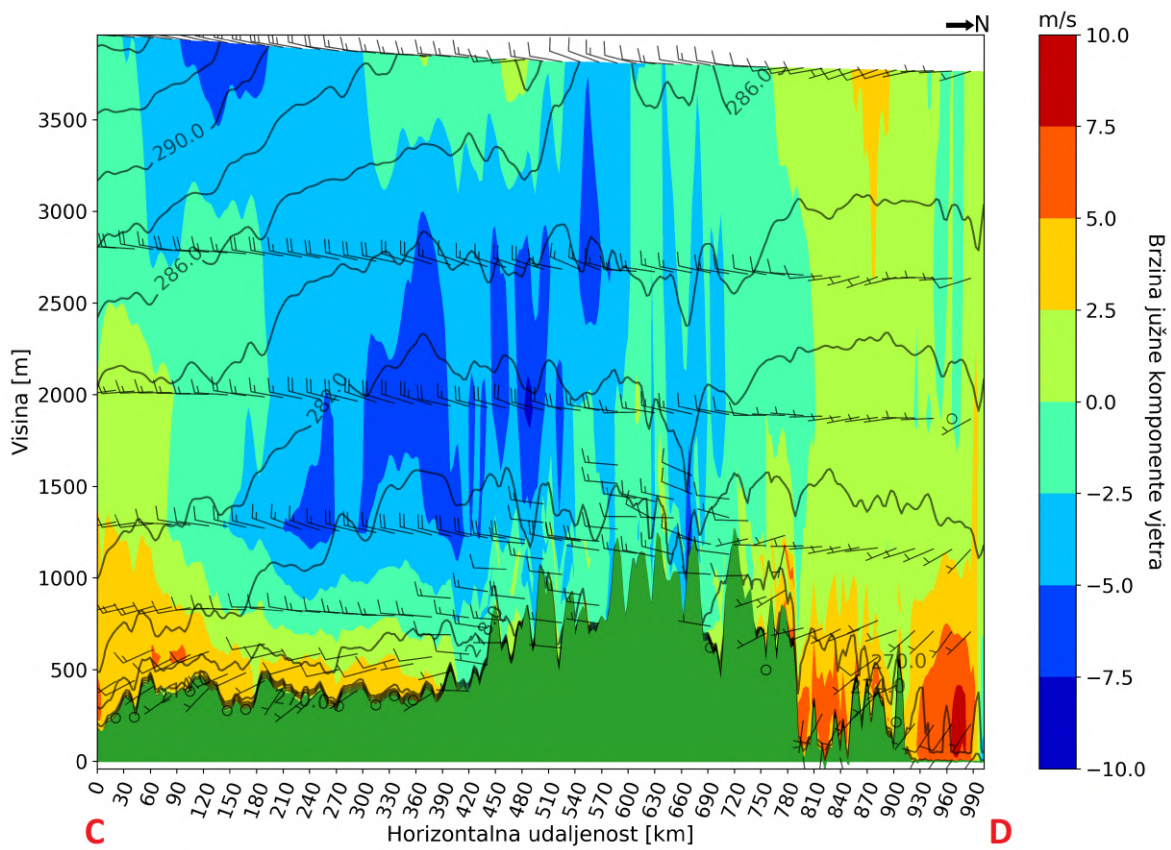


Slika A2. Isto kao i na slici A1 za  $T - 2$  (9. 1. 2005., 6 UTC) u SE poddomeni za CT 3. Na slici dolje lijevo crvena i narančasta linija pokazuju lokacije vertikalnih presjeka prikazanih na slikama A5 i A8, redom.

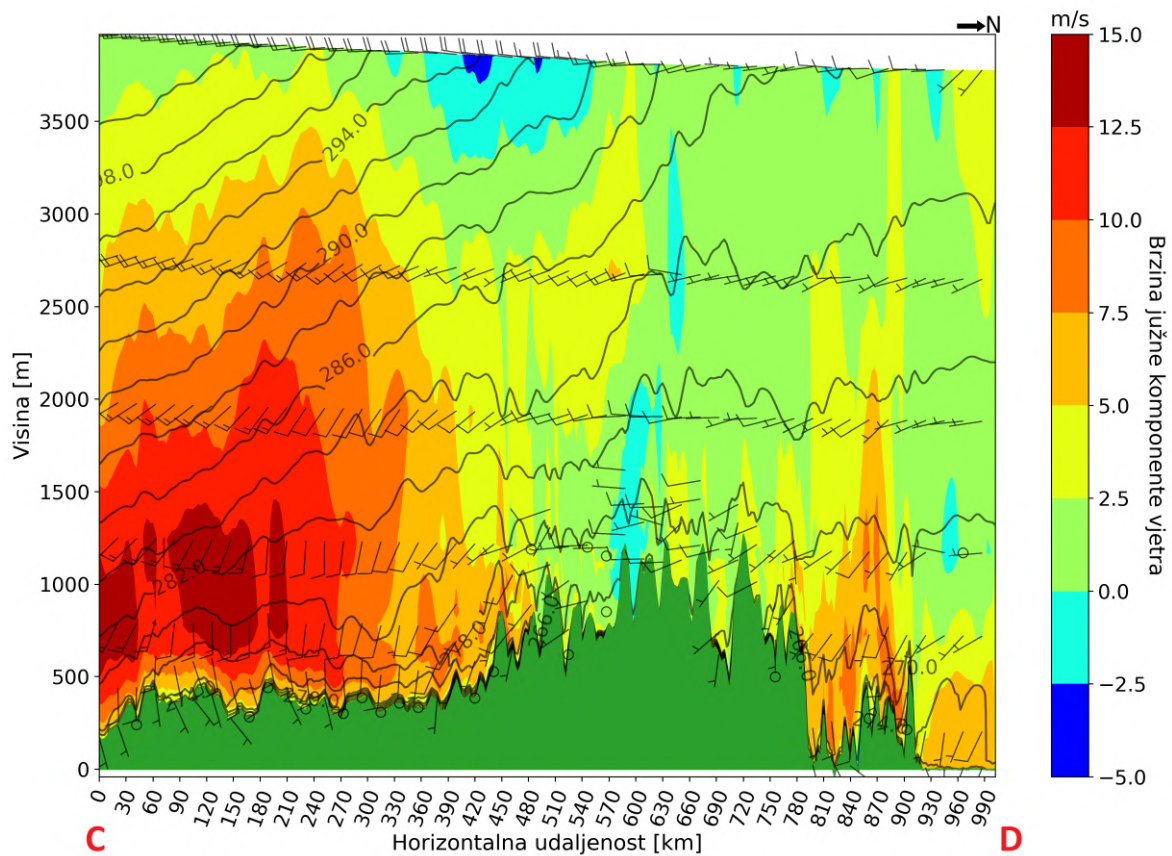




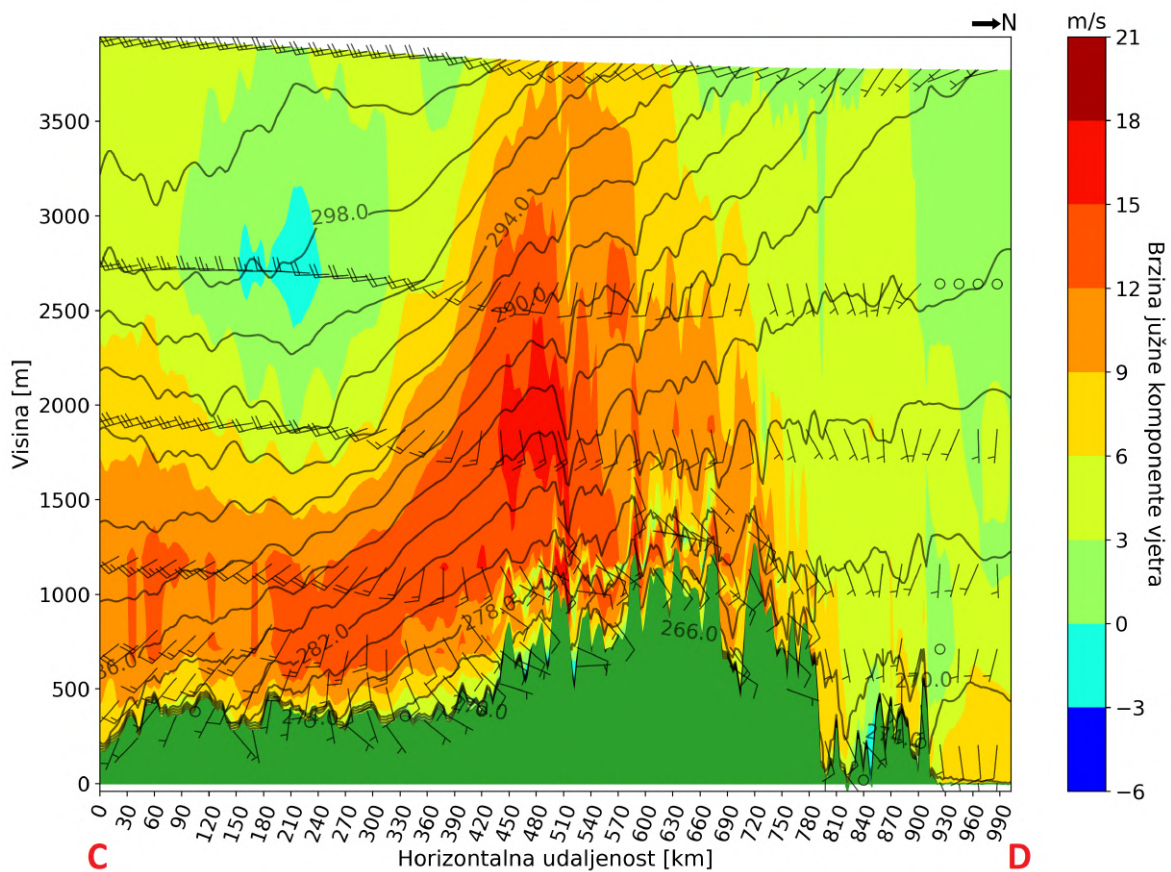
Slika A3. Isto kao i na slici A1 za  $T - 1$  (9. 1. 2005., 12 UTC) u SE poddomeni za CT 3. Na slici dolje lijevo crvena i narančasta linija pokazuju lokacije vertikalnih presjeka prikazanih na slikama A6 i A9, redom.



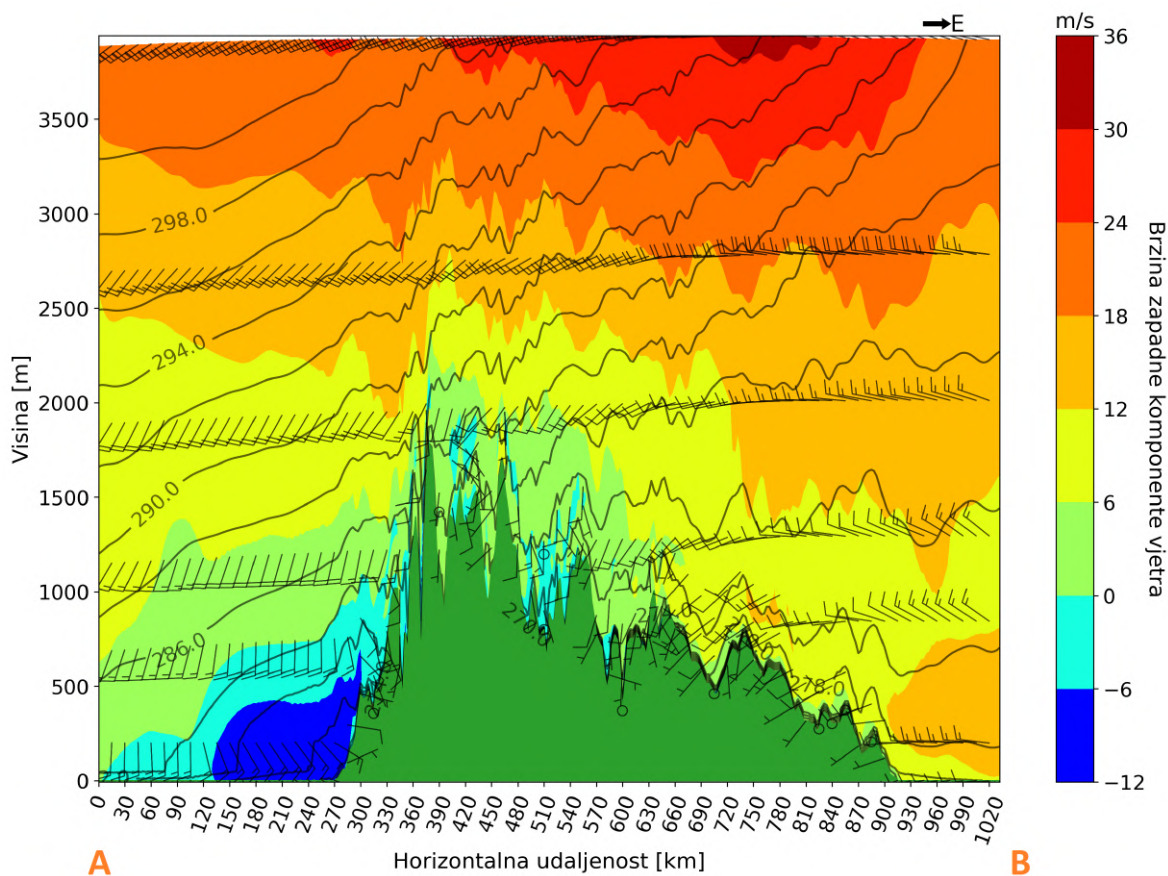
Slika A4.  $T - 3$  (9. 1. 2005., 0 UTC) u SE poddomeni za CT 3 – vertikalni presjek označen na slici A1 crvenom linijom.



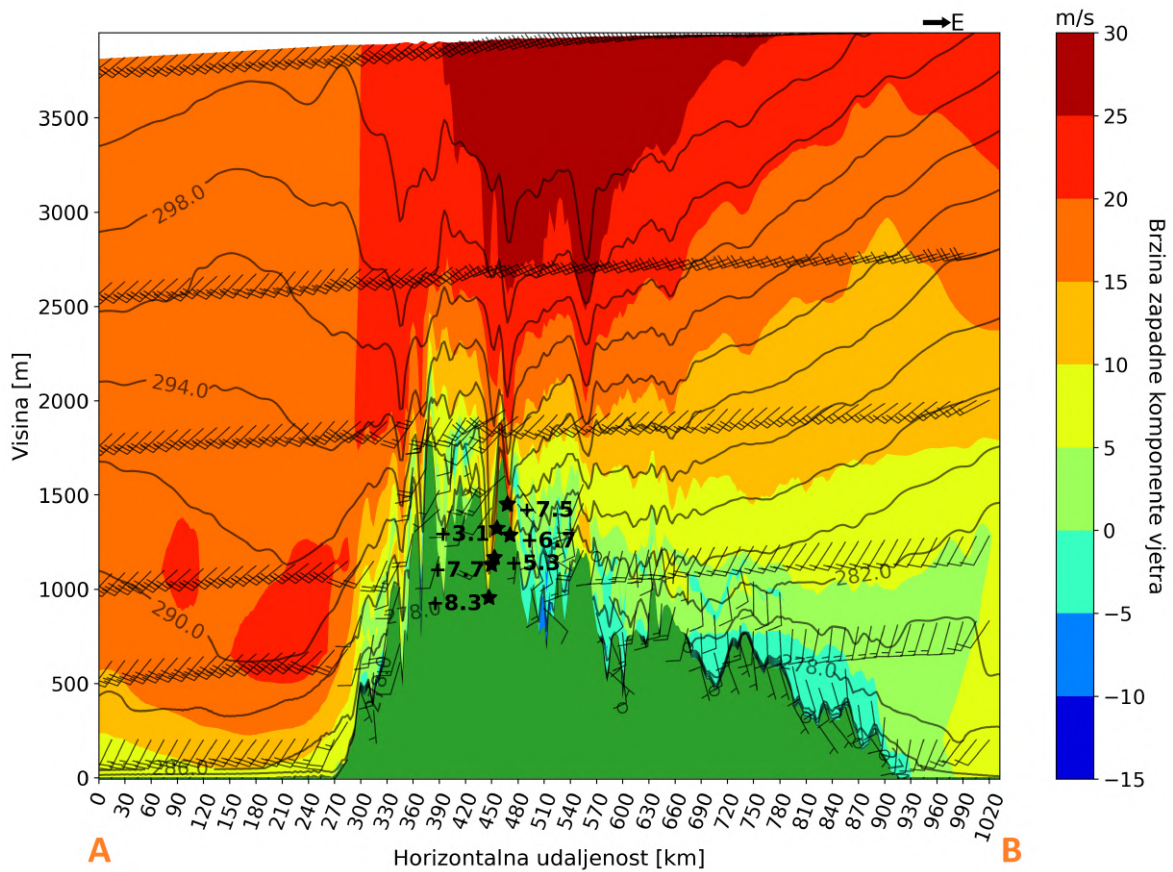
Slika A5.  $T - 2$  (9. 1. 2005., 6 UTC) u SE poddomeni za CT 3 – vertikalni presjek označen na slici A2 crvenom linijom.



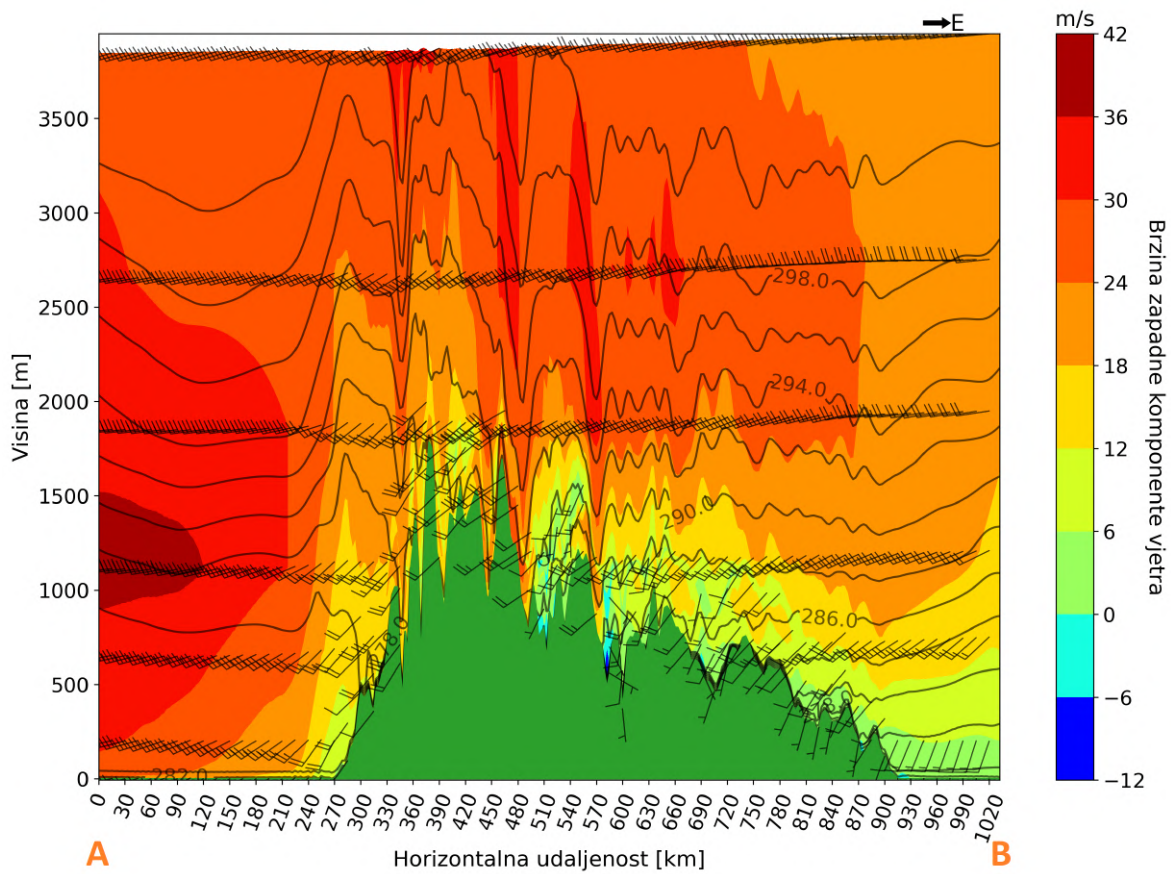
Slika A6.  $T - 1$  (9. 1. 2005., 12 UTC) u SE poddomeni za CT 3 – vertikalni presjek označen na slici A3 crvenom linijom.



Slika A7.  $T - 3$  (9. 1. 2005., 0 UTC) u SE poddomeni za CT 3 – vertikalni presjek označen na slici A1 narančastom linijom.



Slika A8.  $T - 2$  (9. 1. 2005., 6 UTC) u SE poddomeni za CT 3 – vertikalni presjek označen na slici A2 narančastom linijom. Crne zvijezde i brojke pokazuju lokacije ZO-a i iznose promjene temperature.



Slika A9.  $T - 1$  (9. 1. 2005., 12 UTC) u SE poddomeni za CT 3 – vertikalni presjek označen na slici A3 narančastom linijom.