

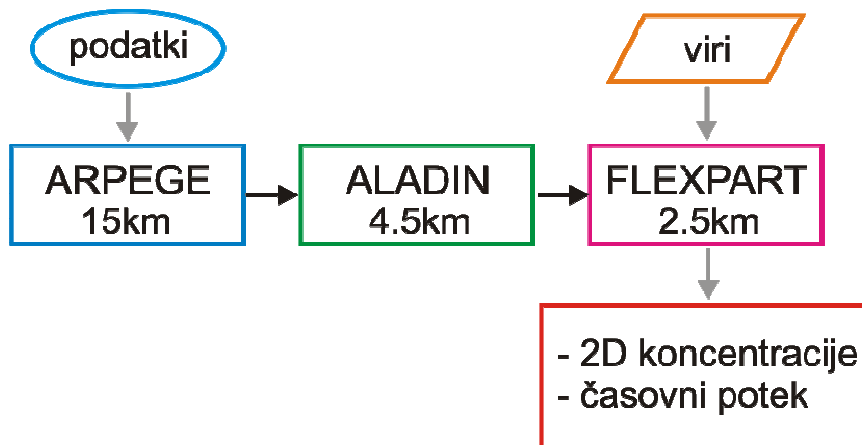
Numerično modeliranje in analiza scenarijev razširjanja onesnaženja v okolici postaje Lovran

projektno poročilo

Mark Žagar, Urška Bajec, Maruška Mole

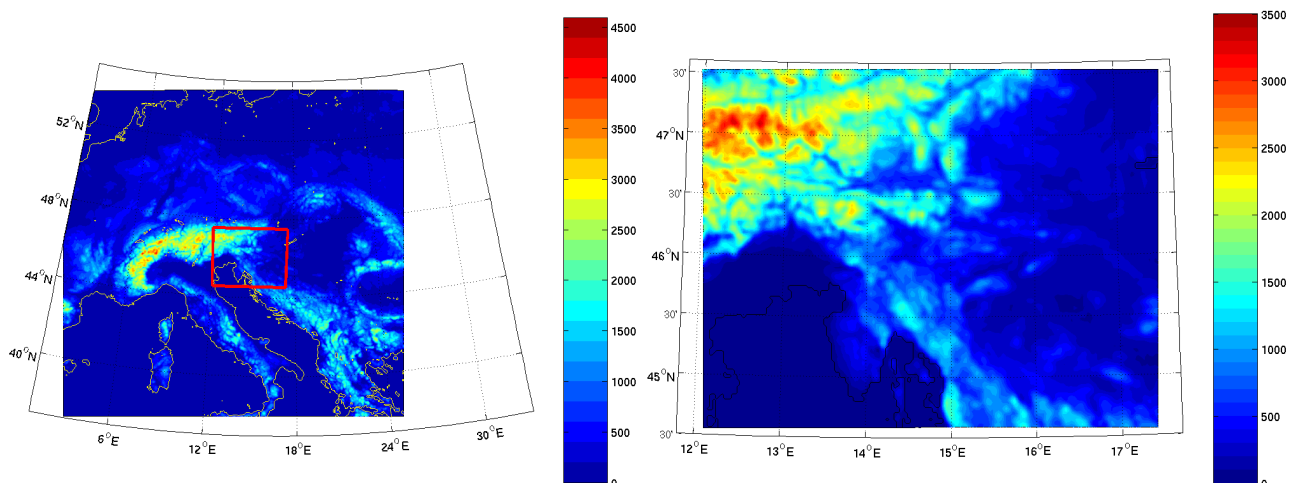
Uvod

Za modeliranje širjenja onesnaženja v okolici postaje Lovran smo izbrali pristop dveh korakov. Najprej smo z meteorološkim modelom ALADIN izračunali časovni potek 3-dimenzionalnih meteoroloških spremenljivk, nato pa z modelom Lagrangevskega razširjanja delcev še potek potencialnega onesnaženja iz vnaprej izbranih virov. Druga možnost bi bila uporaba kombiniranega modela (npr. WRF-Chem), ki bi vzporedno z meteorologijo ob vsakem koraku in na vsakem izračunaval mestu tudi vse relevantne kemijske procese. Taki modeli so dostopni, vendar zahtevajo zelo dobro poznavanje začetnega stanja kemijskih spremenljivk, natančne vrednosti emisij v času in v prostoru, ter predvsem kot najbolj omejujoč dejavnik veliko več računske moči, kot v našem izbranem pristopu. Diagram poteka izračunavanja prikazuje slika 1.



Slika 1. Diagram poteka izračunavanja dveh meteoroloških ter Lagrangevskega modela za oceno vzrokov za povečano onesnaženje na postaji Lovran.

V model ARPEGE v postopku analize vstopajo podatki, izmerjeni na celi Zemlji ter obdelani za uporabo v numeričnem modelu. Analiza modela ARPEGE hkrati predstavlja tudi začetne pogoje za model ALADIN, ki je pomanjšana in boljši resoluciji prilagojena verzija modela ARPEGE. Napovedi modela ARPEGE služijo kot stranski robni pogoji za model ALADIN. S slednjim smo na superračunalniku ARSO izračunali meteorološke pogoje v prostorski ločljivosti 4.5 km nad večjim delom Evrope. Modelsko območje prikazuje slika 2.



Slika 2. Modelsko območje meteorološkega modela ALADIN (levo) in modela za transport onesnaženja (desno).

Model ALADIN je že 12 let operativni prognoistični model slovenske meteorološke službe in je plod razvoja v okviru istoimenskega konzorcija, v katerega je združenih 17 državnih meteoroloških služb Evrope in severne Afrike. V uporabljeni različici vsebuje najnovejše fizikalne parametrizacije, ki so še posebej primerne za ločljivost med 10 in 2.5 km. Dolžina posameznega zagona modela ALADIN je 30 ur, od 00UTC do 06UTC prihodnjega dne, pri čemer za našo analizo uporabimo rezultate od 6 ur naprej, saj so prvih 6 ur modelske integracije nekatere meteorološke spremenljivke, še posebej tiste povezane z vlažnimi diabatnimi ter mikrofizikalnimi procesi, v neskladju. Modelsko območje torej pokriva večji del Evrope, nas pa zanimajo razmere na vplivnem območju okoli merilne postaje s tipičnimi časovnimi dimenzijami manj kot en dan. Radi bi namreč ocenili, kako na potek onesnaženja vplivajo viri v okolici, predvsem v neposredni bližini ter vključno z urbani in industrijskimi središči v malo manj neposredni okolici, vendar brez daljinskega prenosa onesnaženja (ki vsekakor ni nepomembno). Zato smo se odločili, da zaradi ekonomičnosti računsko območje, na katerem smo izračunavali transportni model, zmanjšamo na območje, prikazano na desni polovici slike 2.

Model FLEXPART

Model FLEXPART je Lagrangevski model za advekcijo poljubnega števila delcev. Podroben opis modela najdemo v Stohl et al. (1998), zato na tem mestu le nekaj glavnih značilnosti. Vhod v model so polja meteoroloških spremenljivk, vnaprej izračunana z dinamičnim meteorološkim modelom. Model FLEXPART potrebuje vsaj horizontalni komponenti vetra in temperaturni profil ozračja. Parametre mešanja v tem, najenostavnejšem primeru izračuna oziroma parametrizira sam, na osnovi hrapavosti podlage. Lahko pa iz meteorološkega modela vzame tudi značilnosti turbulence ozračja in konvektivne indekse ter tako za vertikalno mešanje onesnaženja uporabi fizikalno bolj pravilne vrednosti. V našem primeru smo iz modela ALADIN v FLEXPART vnesli prav vse relevantne meteorološke spremenljivke, vključno s sevalnimi tokovi in turbulentnimi tokovi zaznavne, latentne toplote in gibalne količine. Pač pa iz modela ALADIN v uporabljeni verziji modela FLEXPART ni možno vzeti polj vertikalnih hitrosti. Ker lahko vertikalne hitrosti efektivno nadomesti, kar se transporta onesnaženja tiče, seveda, vertikalno turbulentno in konvektivno mešanje ocenjujemo, da ta pomanjkljivost ni bistveno vplivala na rezultate, predstavljene v tem poročilu. Meteorološka polja smo obnavljali vsako uro, advekcija v modelu FLEXPART pa se je izračunavala s 15 minutnimi koraki.

Uporabili smo 36 računskih nivojev v vertikalni smeri, med tlemi in višino 9km, pri čemer jih je bilo 11 znotraj spodnjega 1km ozračja (tabela 1). Računski nivoji sledijo reliefu (sigma-z nivoji).

Tabela 1: razporeditev računskih nivojev v modelu FLEXPART; višine so v metrih nad površjem.

15	37	66	110	267	395
579	774	974	1178	1386	1600
1818	2041	2270	2504	2744	2989
3242	3501	3767	4040	4322	4612
4911	5219	5537	5867	6208	6563
6932	7317	7719	8141	8583	9049

V modelu lahko izberemo določeno število virov onesnaženja, pri čemer je lahko oblika vsakega vira točkovna, linearna, ploskovna ali volumska. Trajanje izpusta na vsakem viru je prav tako določeno s parametri simulacije. Določimo lahko poljubne lastnosti za vsak posamezen vir. Med lastnostmi so tako teža delca, vrsta kot kemijske spojine, razpadni čas npr. za radioaktivne delce, itd. Model nato med integracijo računa lego vsakega delca ob vsakem času ter ob določenih časih pripravi izpis vseh koordinat, poleg tega pa kot opcijo lahko izberemo tudi izpis meteoroloških spremenljivk na lokacijah vseh delcev. Slednje je pomembno za morebitno nadaljnje računanje kemijskih reakcij za posamezne delce ali za reakcije med delci. Ker je v tipični simulaciji število delcev razmeroma veliko, reda velikosti več deset tisoč, program iz prostorske razporeditve posameznih delcev izračuna tudi prostorske koncentracije posameznih onesnaževalcev, ki jih predstavljajo skupine delcev. Vnaprej lahko določimo tudi receptorje, se pravi lokacije, na katerih s poljubno frekvenco izpisujemo koncentracije in ostale rezultate simulacije.

Modelski vidiki epizod s povečanim onesnaženjem

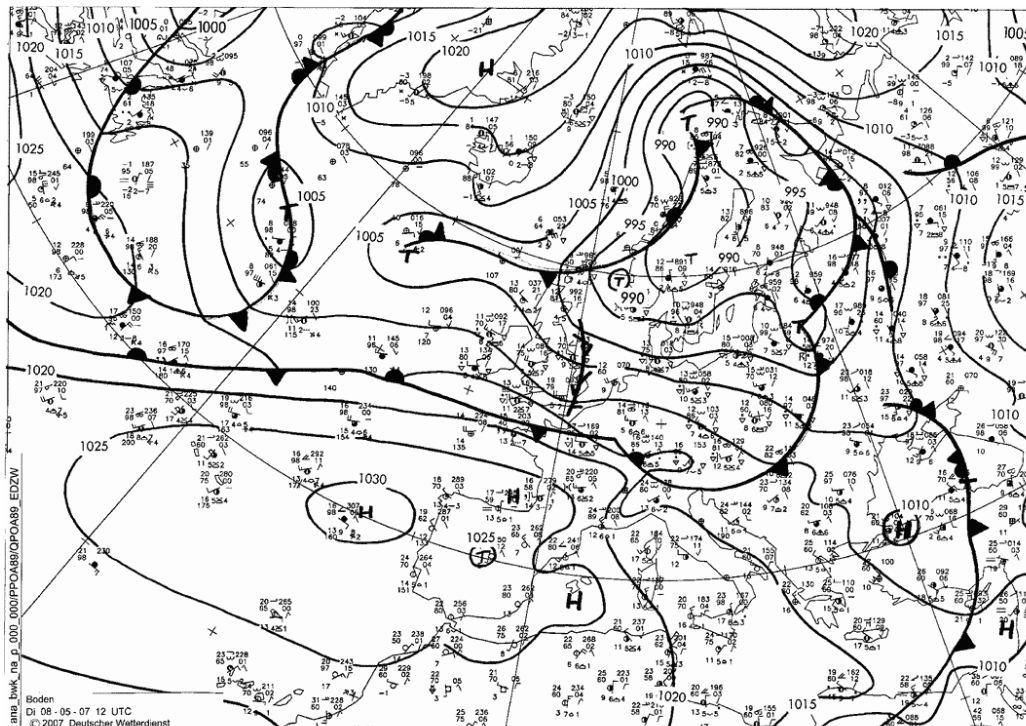
Obravnavali smo posamezna obdobja povečane koncentracije ozona na merilnem mestu Lovran. Iz obdobja med 1. 5. 2007 in 30. 6. 2008 smo tako izbrali devet epizod, pri katerih je urna koncentracija ozona ob maksimumu presegla $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Posamezne urne koncentracije ozona znotraj epizod so navedene v tabeli 2.

Potek izmerjenih vrednosti smo primerjali z modeliranimi rezultati, kjer smo delce spuščali na šestih različnih lokacijah, za katere smo predvidevali, da imajo najmočnejši vpliv. Izbrani so bili kraji: Koper, Trst, Tržič, Reka, Umag in Ljubljana. V času posamezne epizode je bilo iz vsake lokacije v modelu spuščeni skupno 5000 delcev, pri čemer pa moramo upoštevati, da to ne ustreza dejanskemu stanju, saj dejanskih izpustov iz posameznih virov ne poznamo. Tudi na spodnjih grafih primerjav so bile zato vrednosti koncentracij normirane na interval od 0 do 1 (tako modelirane kot tudi izmerjene vrednosti). Pri obravnavi primerov torej lahko primerjamo zgolj obliko krivulje, ki predstavlja izmerjene vrednosti in obliko krivulje modeliranih vrednosti. Na vseh grafih tudi velja, da je izmerjena vrednost prikazana s krivuljo črne barve, medtem ko so modelirane vrednosti barvne. Čas se šteje od polnoči prvega dne epizode dalje.

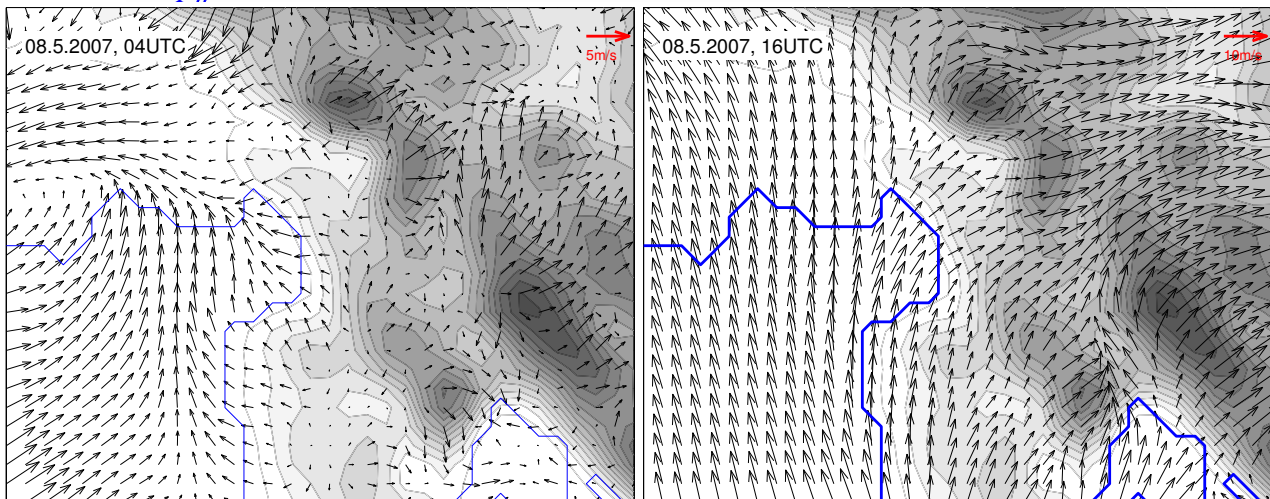
Pomembno je poudariti, da ozon nastaja in razpada lokalno pod vplivom sončnega sevanja ter koncentracij prekurzorjev in ozona samega. V naših simulacijah dejansko modeliramo vire in transport prekurzorjev, koncentracije ozona pa je potrebno nato predvideti s pomočjo poznavanja procesov. Še posebej ugodne za nastanek povečanih koncentracij ozona so situacije, ko ponoči šibki vetrovi ob stabilni spodnji plasti ozračja dovoljujejo, da koncentracije prekurzorjev dosežejo velike vrednosti,

obalne vetrovne cirkulacije.

Epizoda 6. 5. - 9. 5. 2007



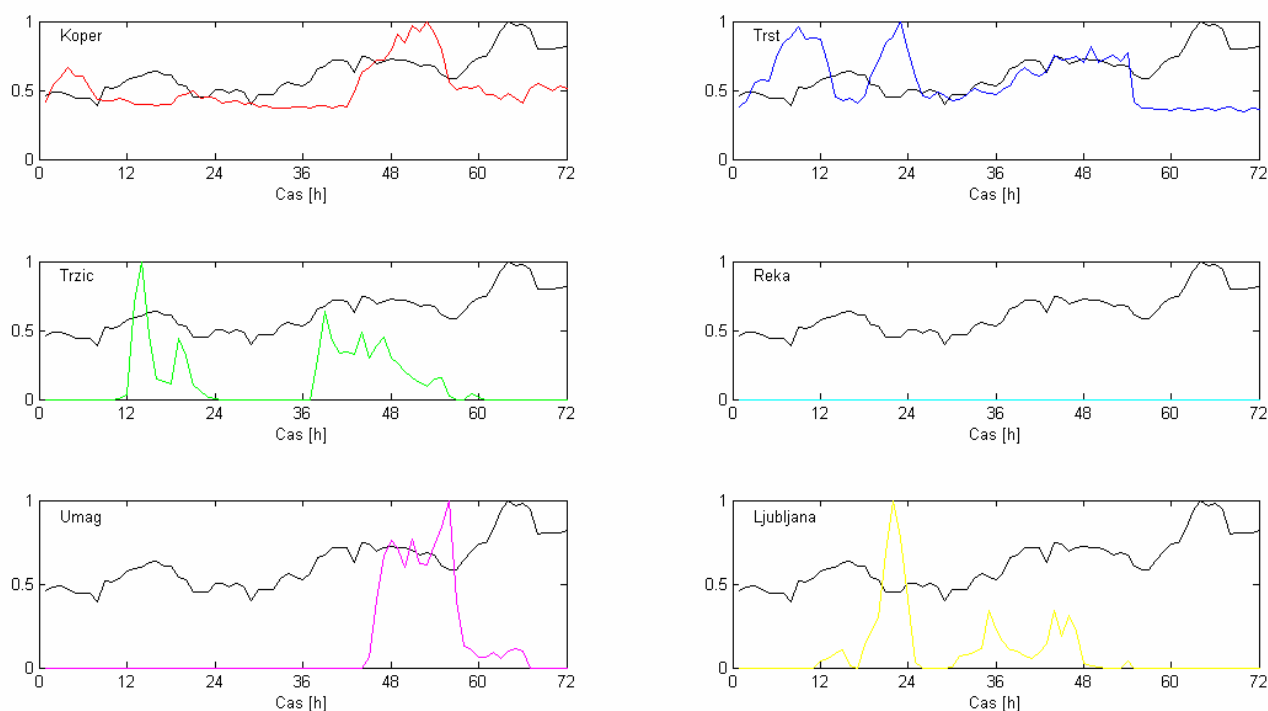
<http://www.wetter3.de>



Slika 3: Veter na višini 10m nad tlemi 8. maja 2007 zjutraj ob 04UTC (levo) in popoldne ob 16UTC (desno), modeliran z modelom ALADIN. Dolžine vektorjev ustrezajo hitrosti vetra, rdeča puščica desno zgoraj pa predstavlja referenčno dolžino vektorja in hitrost, ki jo predstavlja. Obala je označena z modro črto, višina reliefa pa je predstavljena v sivih tonih. Območje obsega Tržaški zaliv, del Furlanije, severno polovico Istre, del Kvarnerskega zaliva in Notranjsko do Ljubljane.

Situacijo je definirala lega fronte preko srednje Evrope. Tipično vremensko karto v tej epizodi prikazuje zgornja slika 3. Na sliki vetrov zjutraj in popoldne (slika 3, spodaj) vidimo splošni južni veter, predvsem nad morjem in šibek veter s kopnega zjutraj, popoldne pa se je južni veter lepo izrazil

Epizoda 6. 5. - 9. 5. 2007



Slika 4: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 6. 5. - 9. 5. 2007.

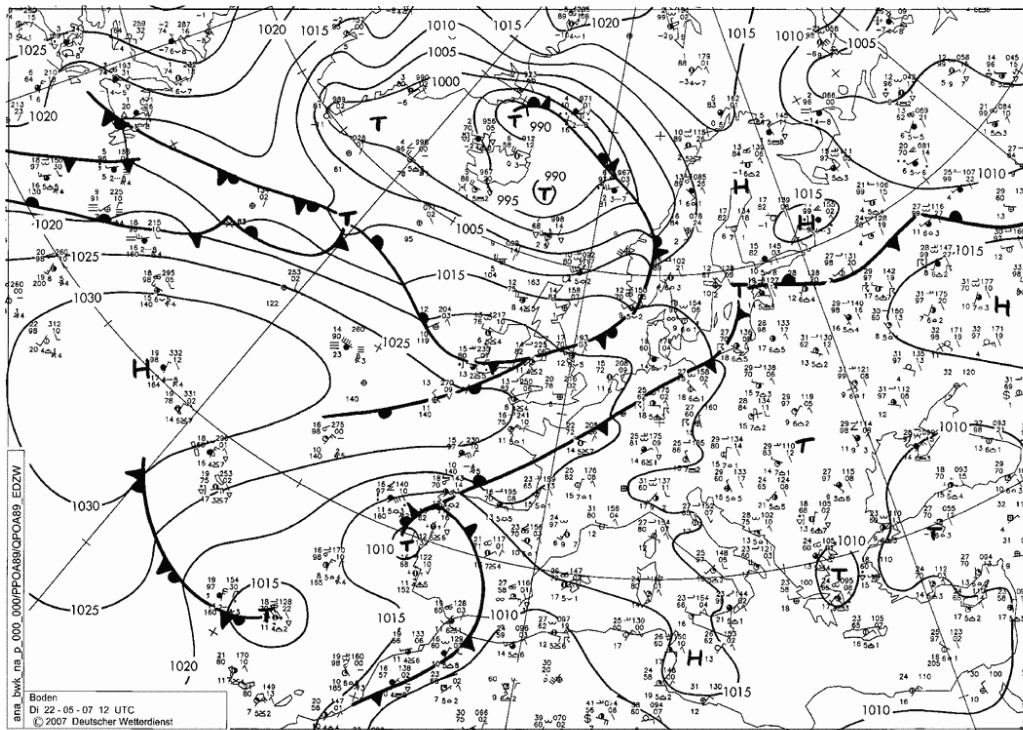
kot jugo nad morjem in jugozahodnik nad kopnim.

Glede na oblike grafov poteka onesnaženja v Lovranu (Slika 4) lahko sklepamo, da so vzrok za maksimum, ki se pojavi med 10 in 20 ur po začetku epizode predvsem izpusti iz Trsta in Kopa, občasno pa je pomemben tudi prispevek izpustov iz Tržiča. Za drugi širši maksimum, ki se pojavi med 35. in 55. uro po začetku epizode so očitno glavni vzrok izpusti iz Trsta (obliki grafov meritev in modeliranih koncentracij sta si zelo podobni), pomagajo pa tudi dodatni izpusti iz Tržiča, Kopa in Umaga. Prispevek iz Reke je zanemarljiv, prav tako pa tudi prispevek iz Ljubljane. Čeprav se zaradi izpustov iz Ljubljane na mestu detektorja v modelu pojavi maksimum, moramo upoštevati, da gre za maksimum, ki je velik zgolj relativno glede na siceršnje prispevke iz Ljubljane. Kot je razvidno tudi iz priloženih animacij, so običajno prispevki iz Ljubljane majhni oziroma jih ni, kar je tudi pričakovano, saj so vetrovi iz vzhodne smeri redki.

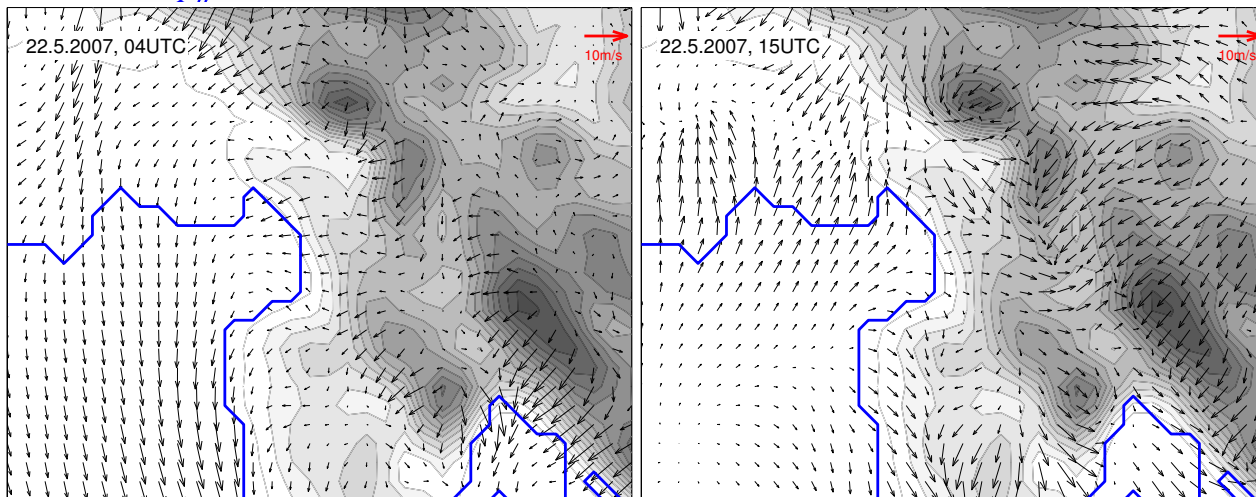
Kot rečeno je treba potek modeliranega onesnaženja razumeti predvsem kot potek koncentracije prekursorjev za nastanek ozona. Pričakovati je torej, da imajo modelirane koncentracije vrh nekaj ur pred vrhom izmerjene koncentracije ozona. Predvsem gre za že omenjeni mehanizem, ko se v šibkih vetrovih in v stabilnem ozračju ponoči in zjutraj nabere v zraku veliko onesnaženja iz podanih virov, ki nato preko dneva ob prisotnosti sončnega sevanja povzroči porast koncentracije ozona. Na sliki 4 je to najlepše videti v krivuljah za Koper pri urah 48 oziroma 60.

To interpretacijo modeliranih in izmerjenih koncentracij je potrebno uporabiti pri vseh nadaljnjih prikazanih epizodah in je niti ne bomo več posebej omenjali.

Epizoda 20. 5. - 26. 5. 2007



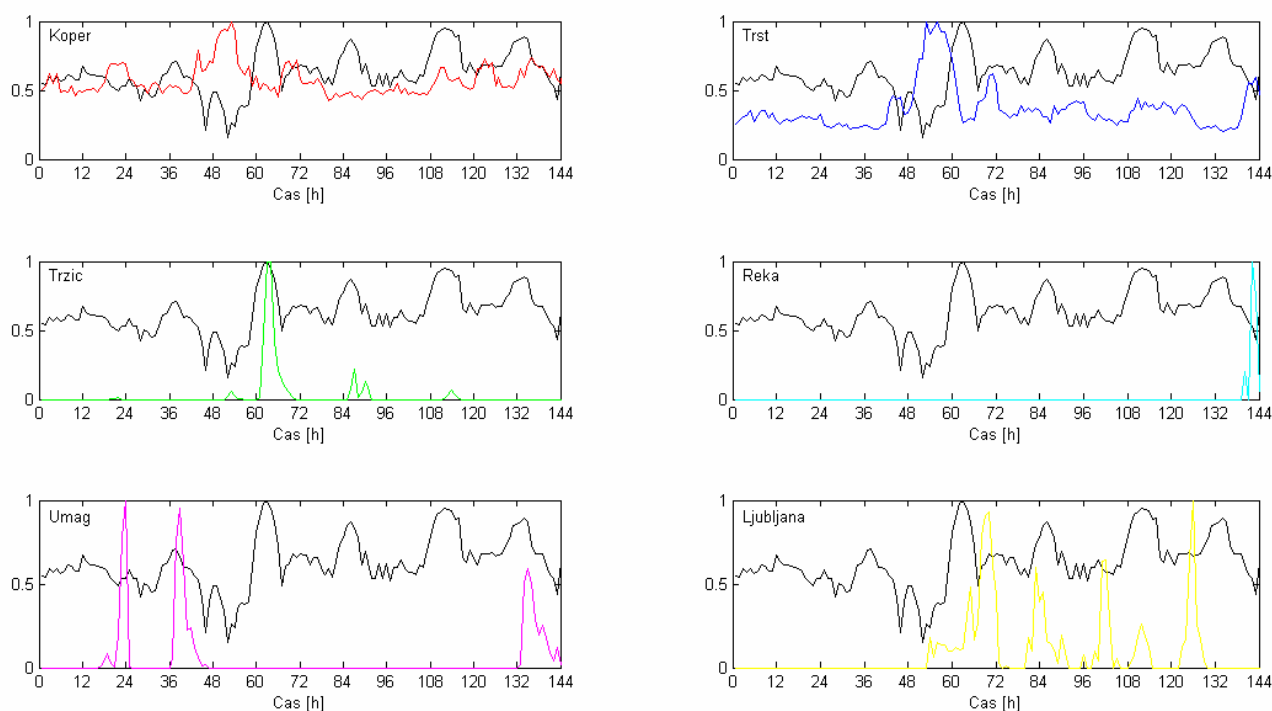
<http://www.wetter3.de>



Slika 5: kot slika 3, le za 22. maj 2007 ob 04UTC (levo) in 15UTC (desno).

V tej vremenski situaciji se pojavljajo pretežno precej šibki lokalni termični vetrovi. Lepo je videti npr. konvergenčno linijo vetra pri tleh iz severovzhoda in severozahoda nad grebenom Nanosa in v Postojnskih vratih v popoldanskem času izbranega dne (slika 5, desno). Pogoji so spet ugodni za nastanek povečanih koncentracij ozona, kar se je dejansko tudi zgodilo.

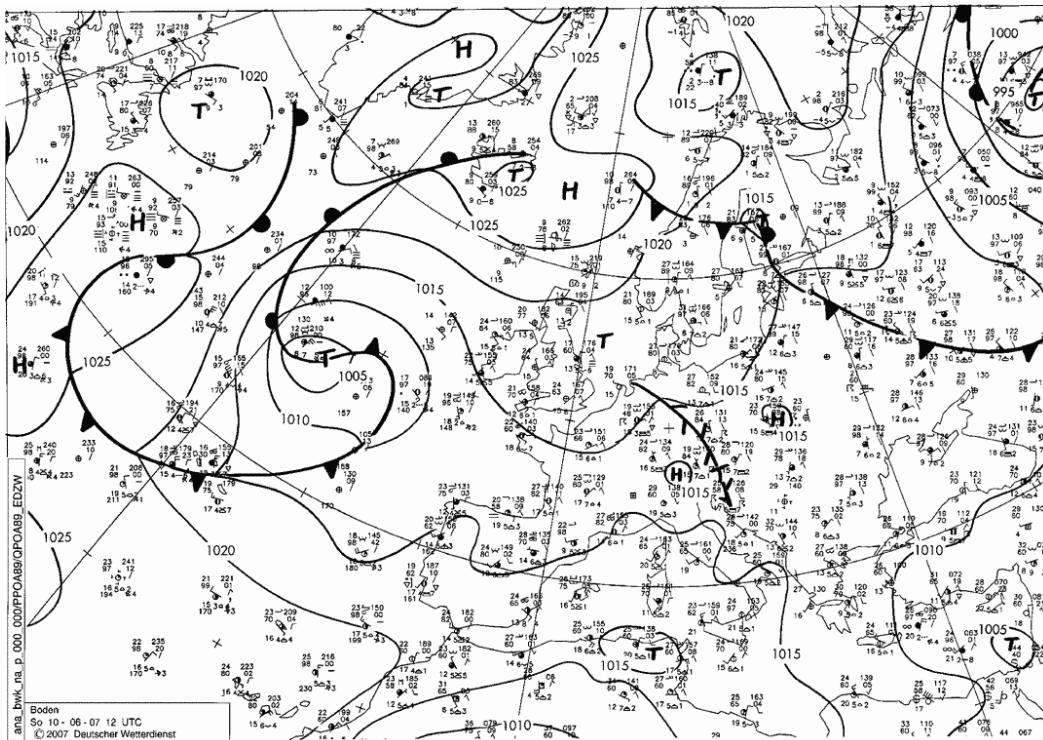
Epizoda 20. 5. - 26. 5. 2007



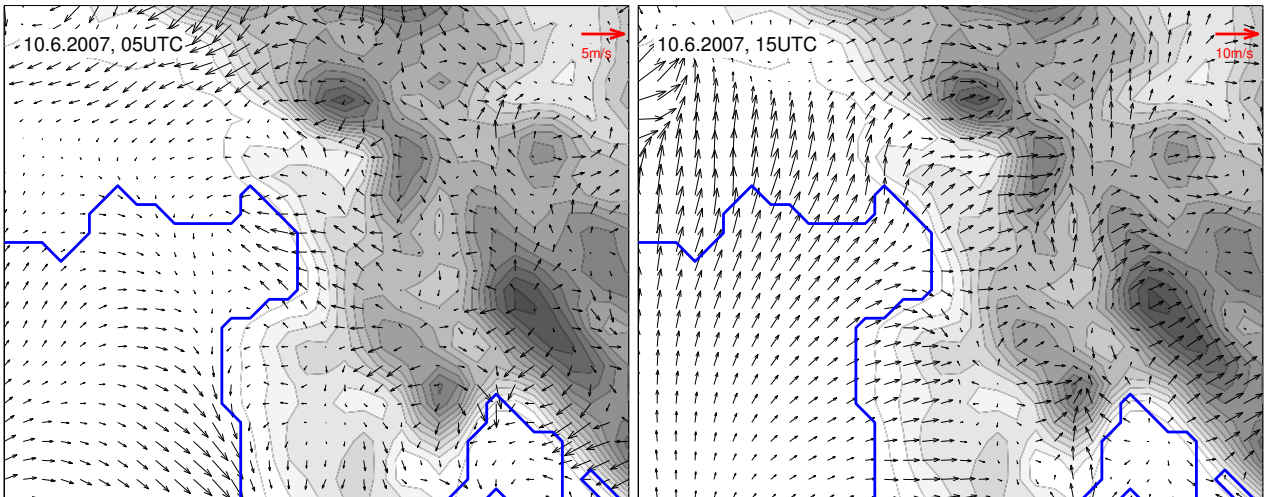
Slika 6: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 20. 5. - 26. 5. 2007.

Najmočnejši maksimum se pojavi okoli 60 ur po začetku epizode. Izredno lepo je koreliran z maksimumoma modeliranega onesnaženja iz virov v Trstu in Kopru 6 do 12 ur prej. To se sklada z interpretacijo, podano v prejšnjem poglavju. Dodatni prispevek pri tem maksimumu so še izpusti iz Tržiča, za katere maksimum časovno sovпада z izmerjenim ozonom. Možno je, da je iz Tržiča zato nad Lovran prišla že zračna masa, obogatena z ozonom.. Naslednja nekoliko nižja maksimuma, ki se pojavita pri približno med 90. in 110. uro po začetku epizode, sta skupek prispevkov iz Kopra in Trsta. K zadnjemu večjemu maksimumu po 135 urah po začetku epizode morda prispevajo izpusti iz Umaga in Kopra. Prispevki iz Reke in Ljubljane se znova izkažejo kot zanemarljivo majhni.

Epizoda 8. 6. - 11. 6. 2007



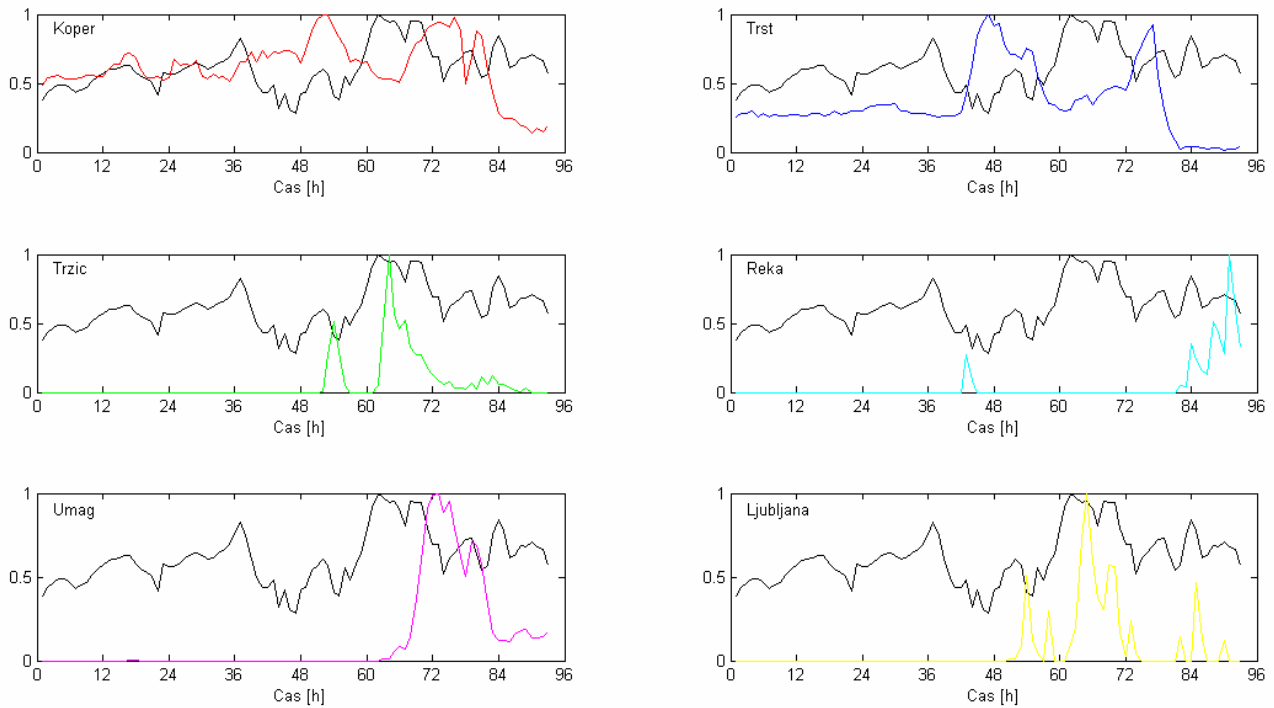
<http://www.wetter3.de>



Slika 7: kot slika 3, le za 10. junij 2007 ob 05UTC (levo) in 15UTC (desno).

V tej situaciji imajo vetrovi v Tržaškem zalivu nekoliko drugačen režim, kot drugod, saj se pojavlja zelo omejeno območje jugovzhodnika v jutranjih urah. Podnevi vetrovne razmere ustrezajo poletnemu tipu v tem delu regije.

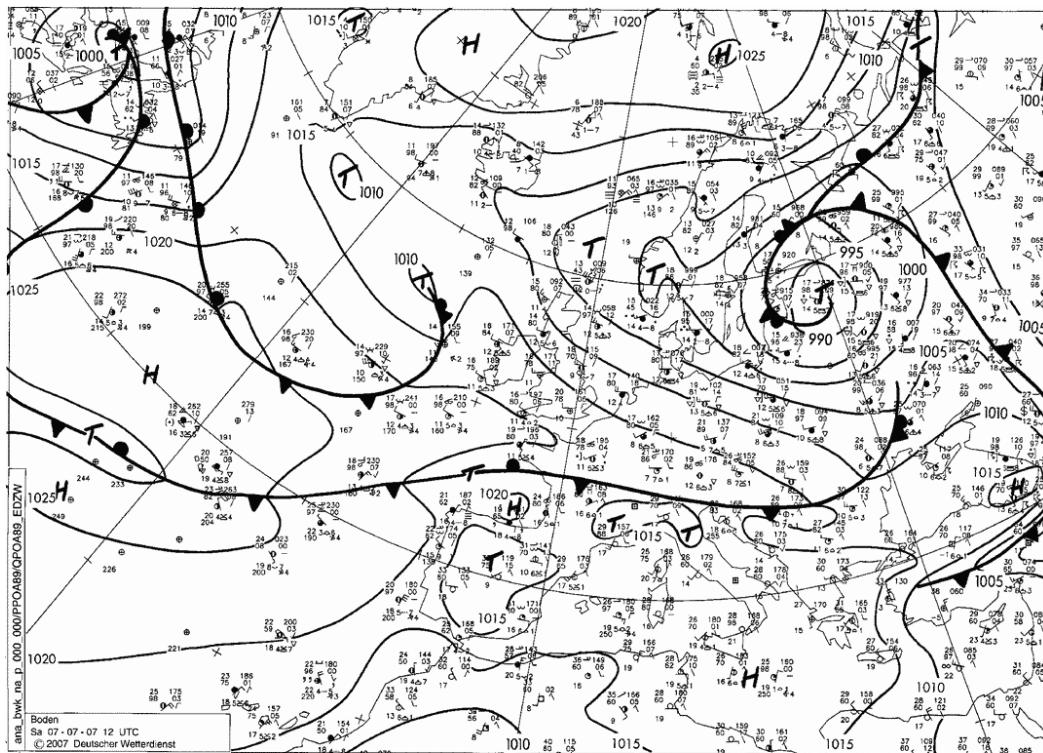
Epizoda 8. 6. - 11. 6. 2007



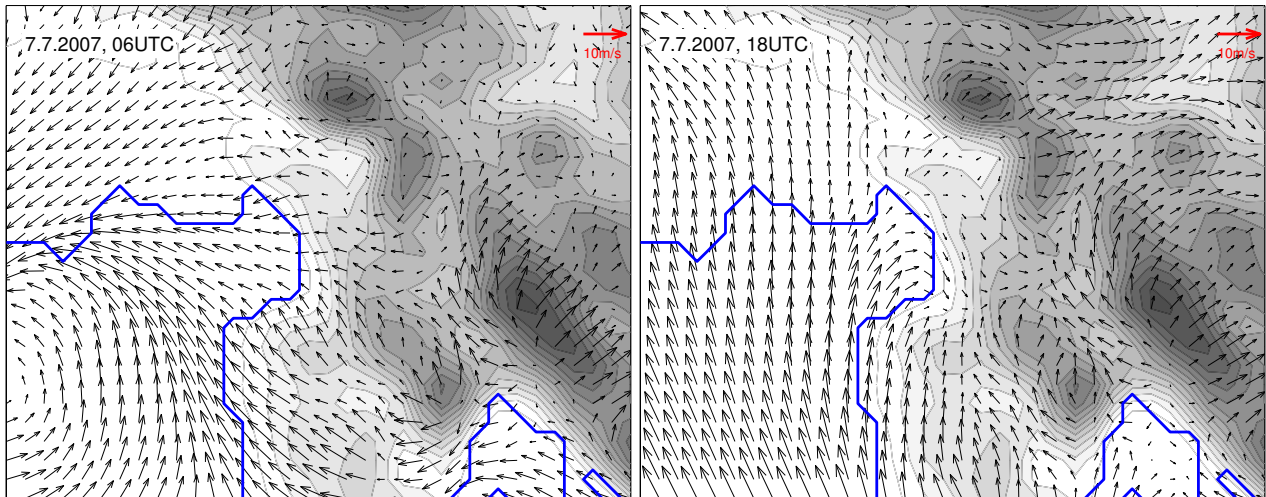
Slika 8: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 8. 6. -11.6. 2007.

Med 60 in 70 urami po začetku epizode se pojavi največji maksimum, ki je spet lepo koreliran z modeliranimi vrhovi onesnaženja iz Kopra in Trsta v pretekli noči. Preostale visoke izmerjene vrednosti najboljše razložijo modelirani izpusti v Kopru, saj so koncentracije koprskega onesnaženja nad Lovranom vseskozi dokaj visoke.

Epizoda 5. 7. - 8. 7. 2007



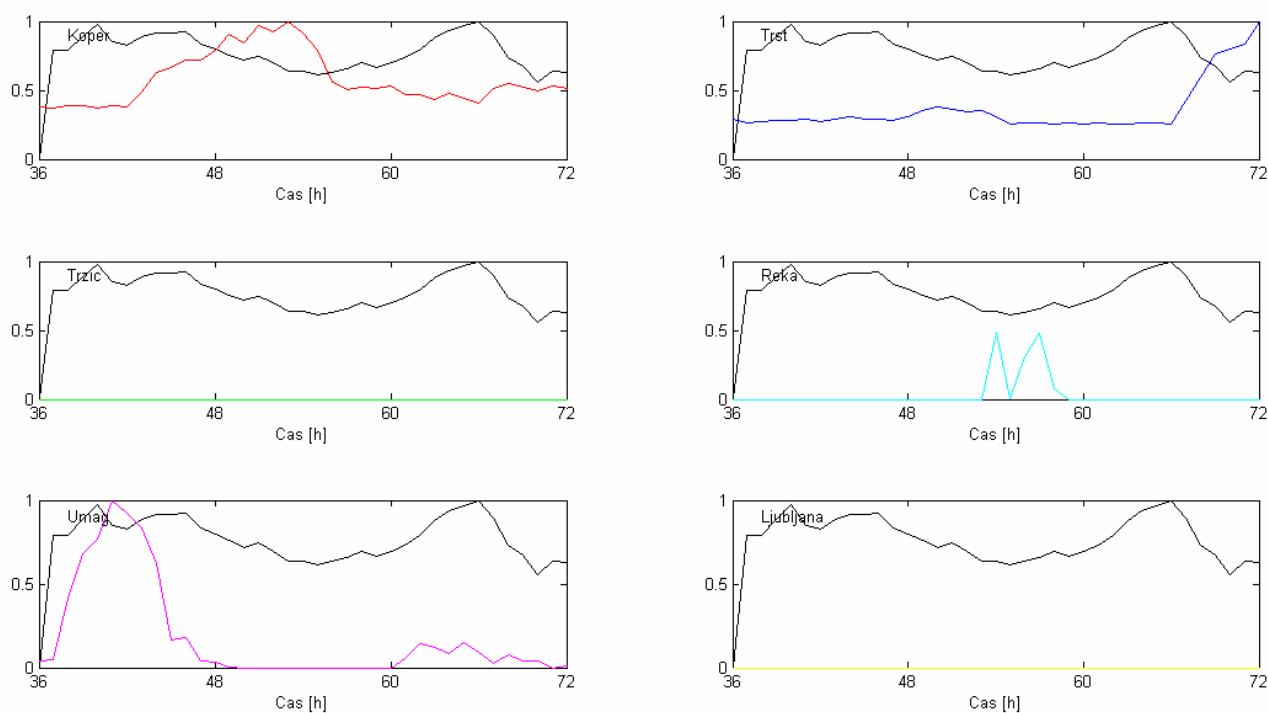
<http://www.wetter3.de>



Slika 9: kot slika 3, le za 7. julij 2007 ob 06UTC (levo) in 18UTC (desno).

Zaradi bližine fronte je nad obravnavanim območjem ponoči in nad morjem tudi podnevi pihal jugo, na katerega smer pa je nekoliko vplival termični razvoj, saj vidimo, da je zjutraj zavijal stran, podnevi pa proti obali. Zaradi tega vpliva je tudi nastala možnost povečanja koncentracij ozona v tej epizodi.

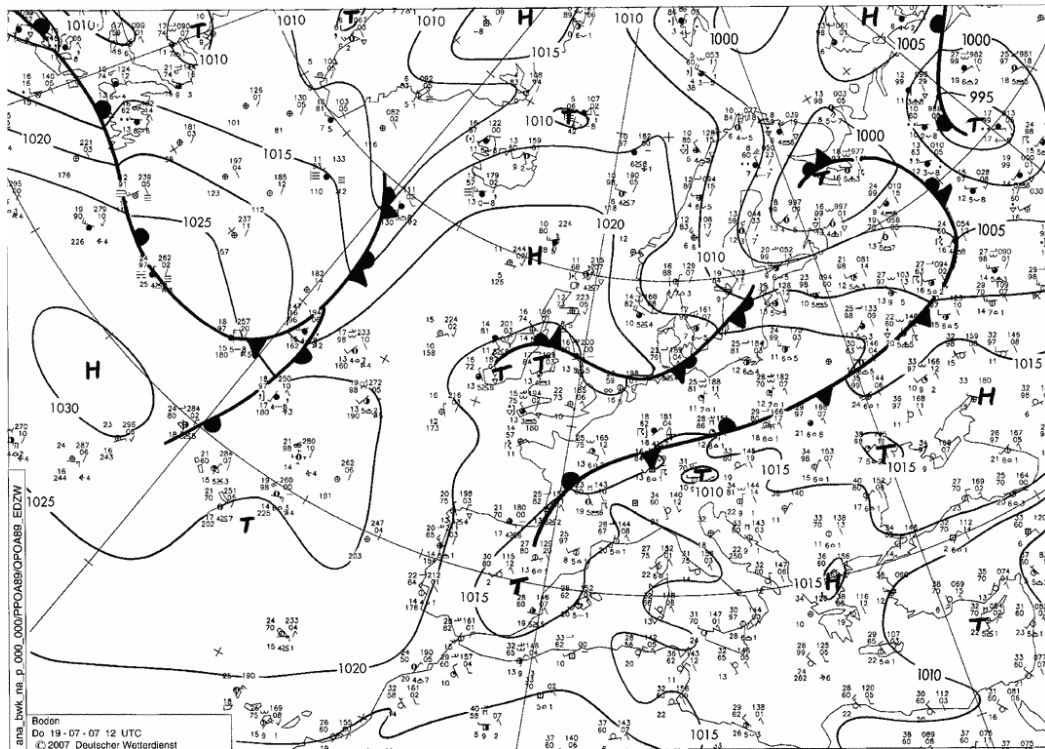
Epizoda 5. 7. - 8. 7. 2007



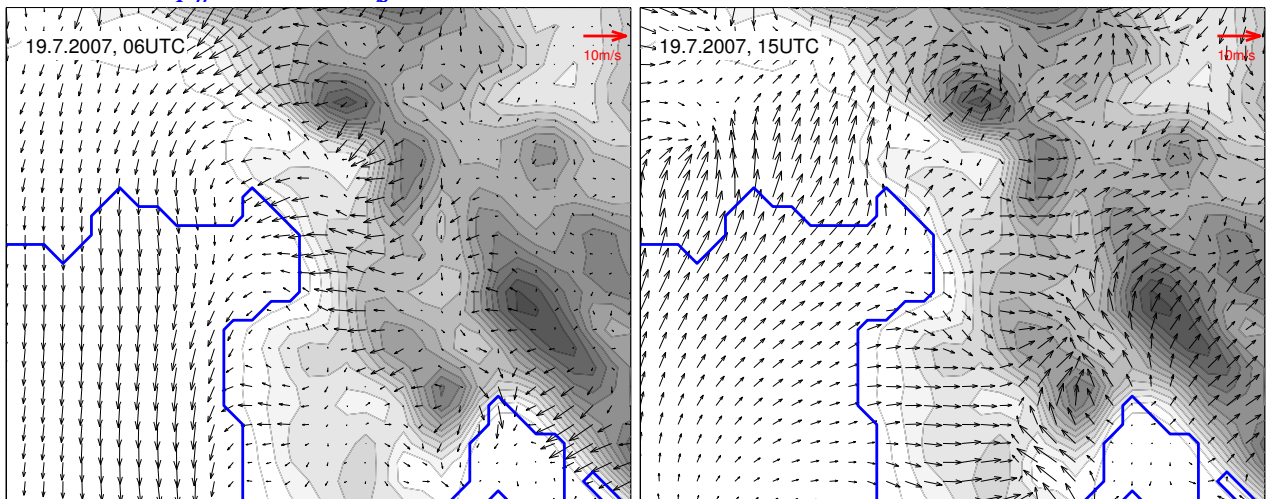
Slika 10: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 5. 7. - 8.7. 2007.

Maksimum, ki se pojavi nekoliko pred 40 urami po začetku, je očitno v največji meri posledica ozona iz Umaga, glavni maksimum med 60 in 70 urami po začetku epizode pa je sestavljen iz prispevkov izpustov Umaga, Kopra, Trsta.

Epizoda 12. 7. - 24. 7. 2007



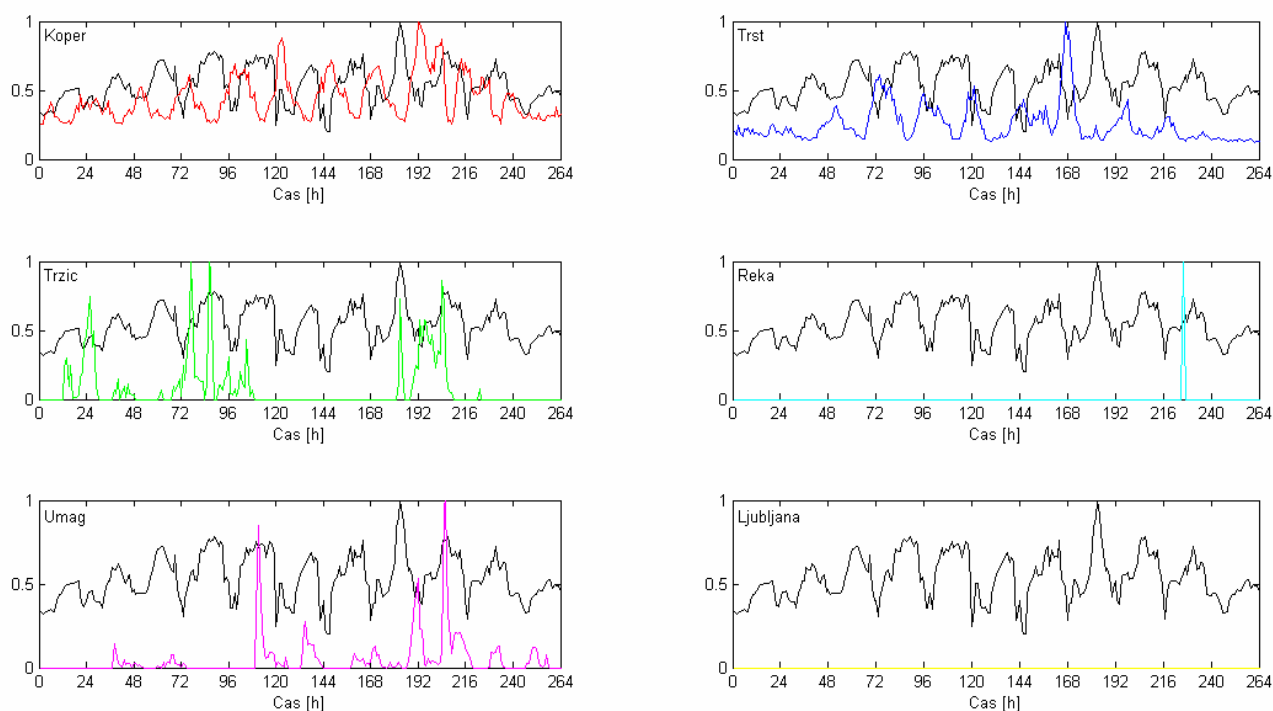
<http://www.wetter3.de/fax>



Slika 11: kot slika 3, le za 19. julij 2007 ob 06UTC (levo) in 15UTC (desno).

V tem primeru gre za zelo dolgo epizodo, v kateri so se dan za dnem pojavljale zelo visoke koncentracije ozona. Vremenska situacija je bila ves čas praktično enaka. Prevladovali so šibki dnevni vetrovi, katerih tipičen primer je prikazan na sliki 11.

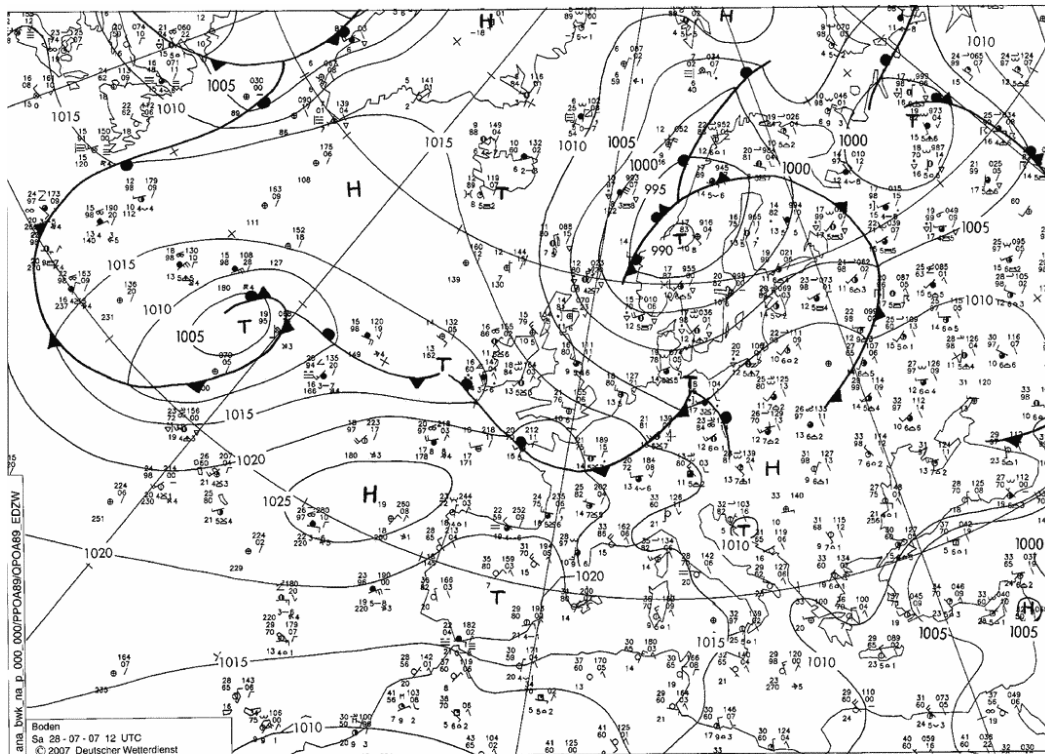
Epizoda 12. 7. - 24. 7. 2007



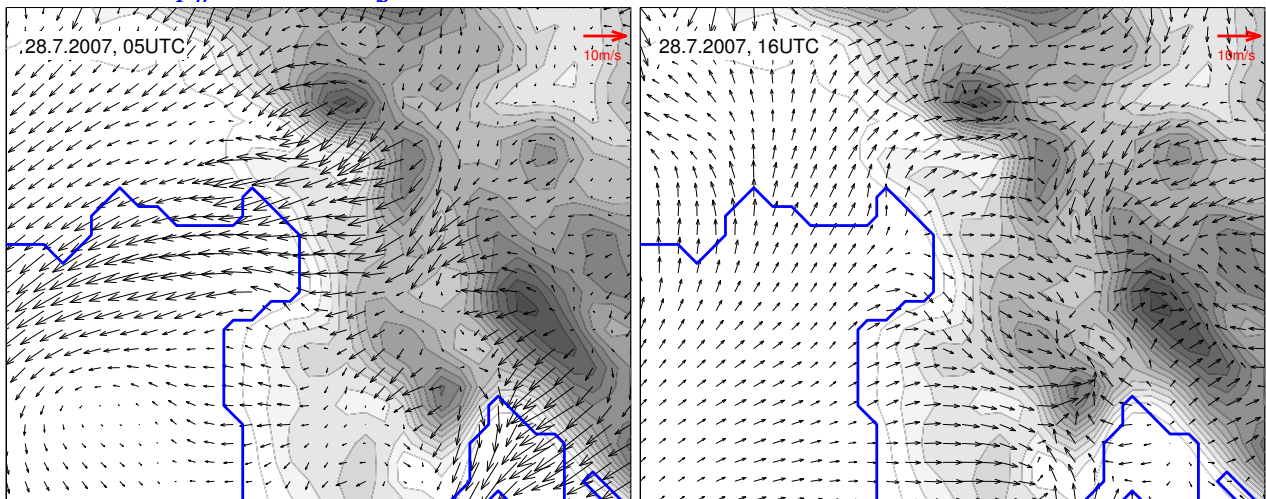
Slika 12: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 12. 7. - 24. 7. 2007.

Na sliki 12 vidimo, da je bil potek izmerjene koncentracije ozona v Lovranu izredno pravilen, saj je dnevni hod lepo opazen. Koncentracije so visoke sredi dneva in v popoldanskem času, ponoči pa so precej nižje. Prav tako obliko, le s faznim zamikom 12 ur, imajo modelirane koncentracije onesnaženja iz Kopa in Trsta, torej iz bližnjih virov. Izjemoma se pojavijo povišane koncentracije onesnaženja iz Tržiča in Umaga. Predvsem zadnje običajno na lokaciji Lovran časovno sovpadajo z maksimumom koncentracije ozona, ker verjetno pomeni, da gre v slednjem primeru za transport ozona.

Epizoda 25. 7. - 29. 7. 2007



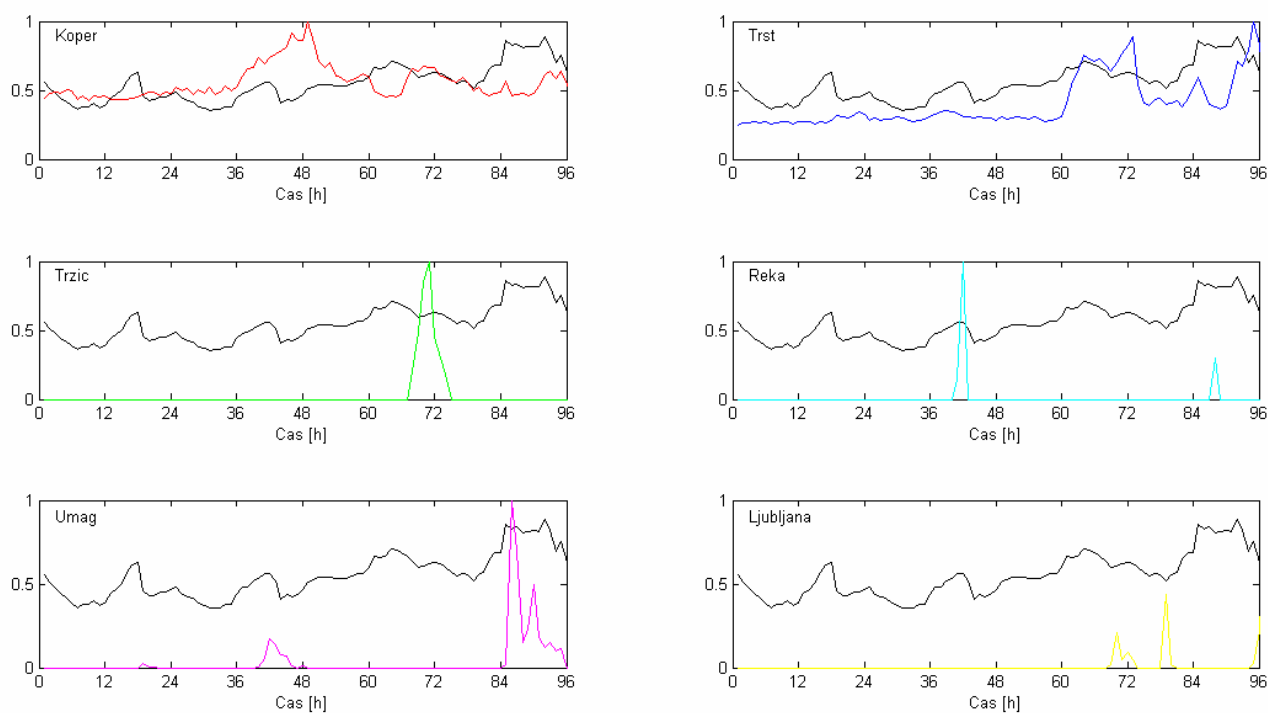
<http://www.wetter3.de/fax>



Slika 13: kot slika 3, le za 28. julij 2007 ob 05UTC (levo) in 16UTC (desno).

Na sliki 13, kjer je prikazano vetrovno polje zjutraj in popoldne na dan, ko so bile koncentracije ozona v Lovranu v celi epizodi najvišje je videti, da je zjutraj nad Tržaškim zalivom še pihala ne tako šibka burja, popoldne pa maestral, ki je očitno premagal burjo, saj se vetrova srečata pri Postojni.

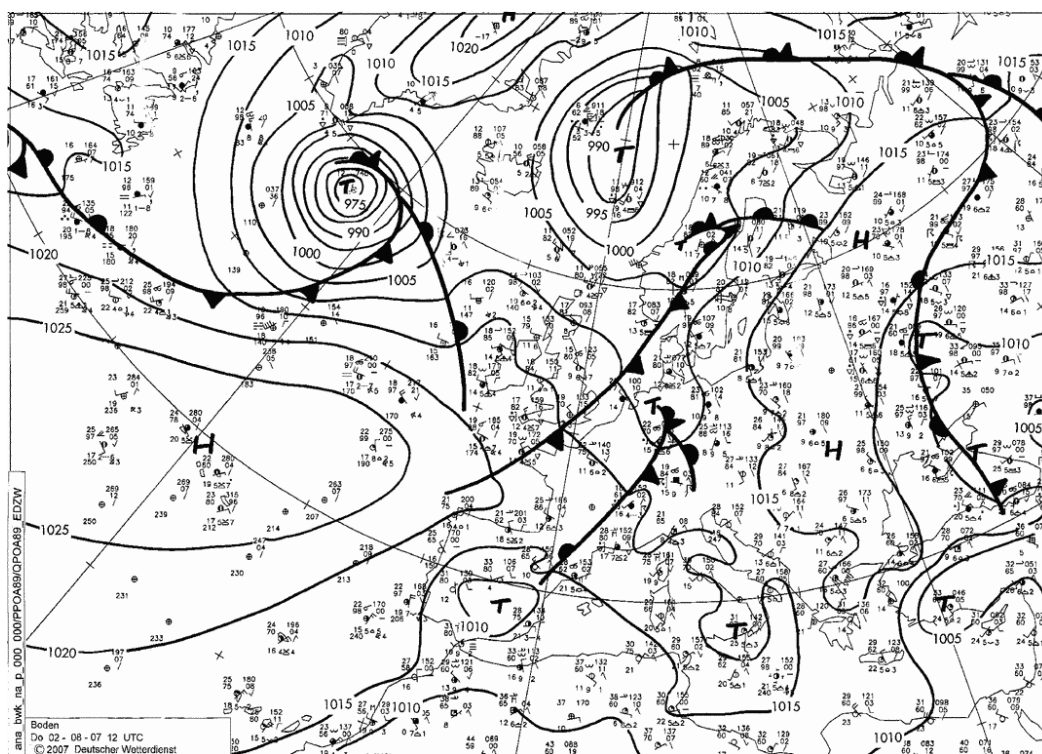
Epizoda 25. 7. - 29. 7. 2007



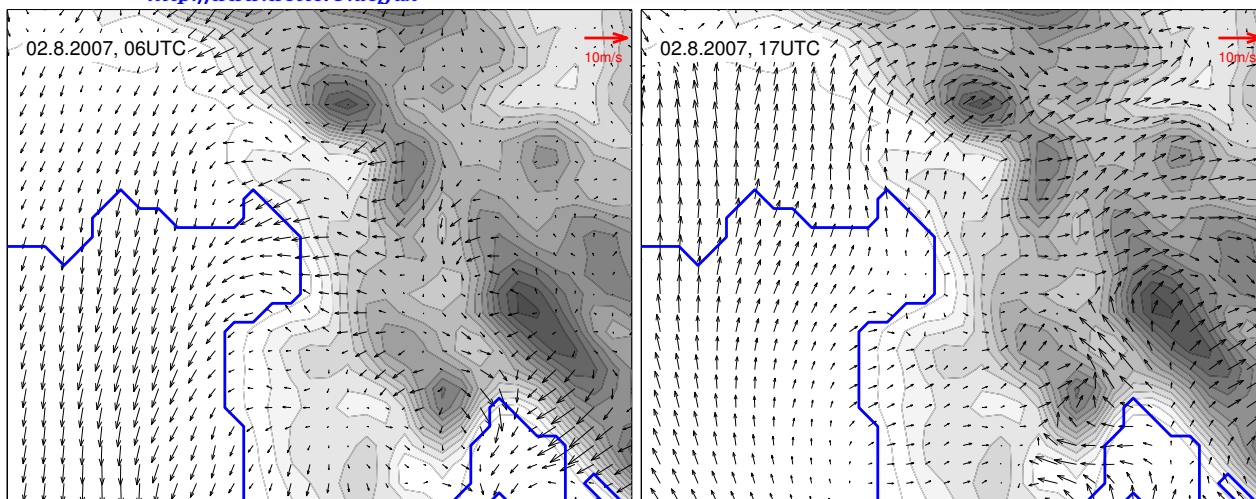
Slika 14: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 25. 7. - 29. 7. 2007.

Epizoda nima zelo izrazitih maksimumov, se pa pojavi povečanje koncentracije med 60 in 70 ur po začetku epizode, ki je v največji meri posledica izpustov iz Trsta, nekoliko pa tudi iz Kopra in Tržiča. Naslednji izrazitejši porast se pojavi okoli 85 ur po začetku in je delno posledica izpustov iz Umaga, delno pa iz Tržiča.

Epizoda 1. 8. - 3. 8. 2007



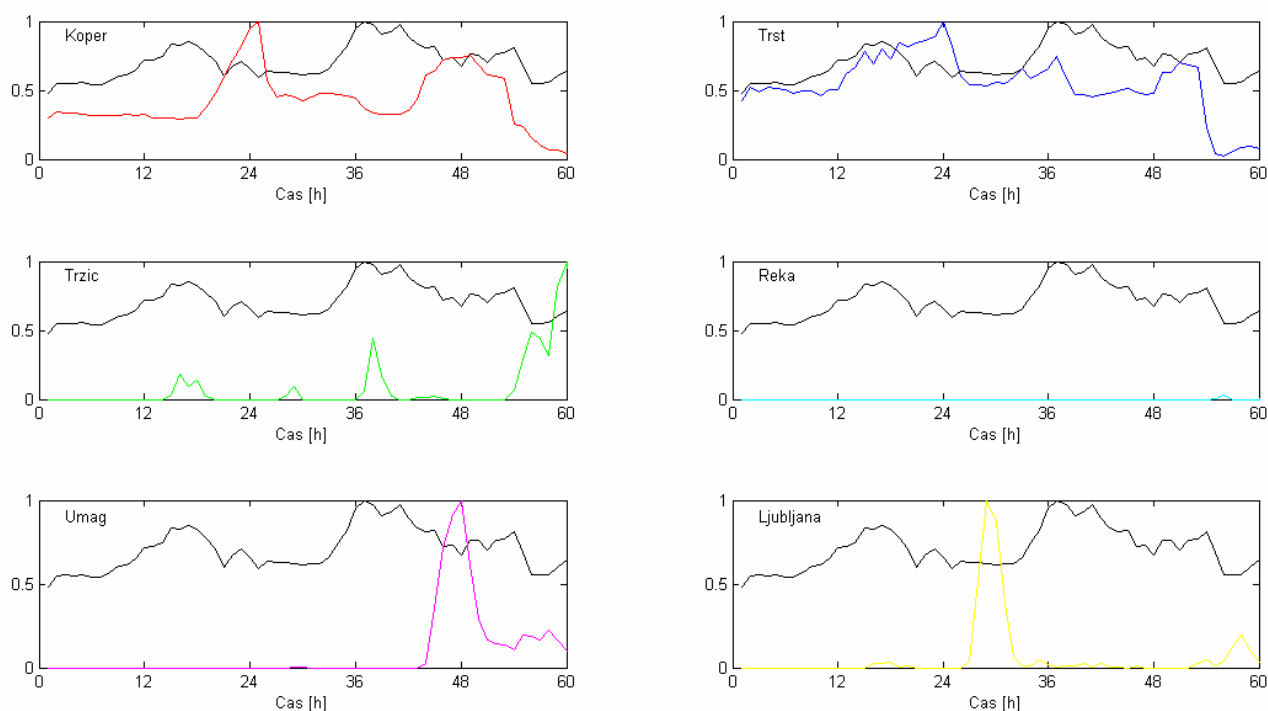
<http://www.wetter3.de/fax>



Slika 15: kot slika 3, le za 2. avgust 2007 ob 06UTC (levo) in 17UTC (desno).

V tem primeru v tipični vetrovni situaciji spet prevladujejo šibki lokalni vetrovi. Popoldne maestrals ob obali praktično ni, razen ob severozahodni obali Istre.

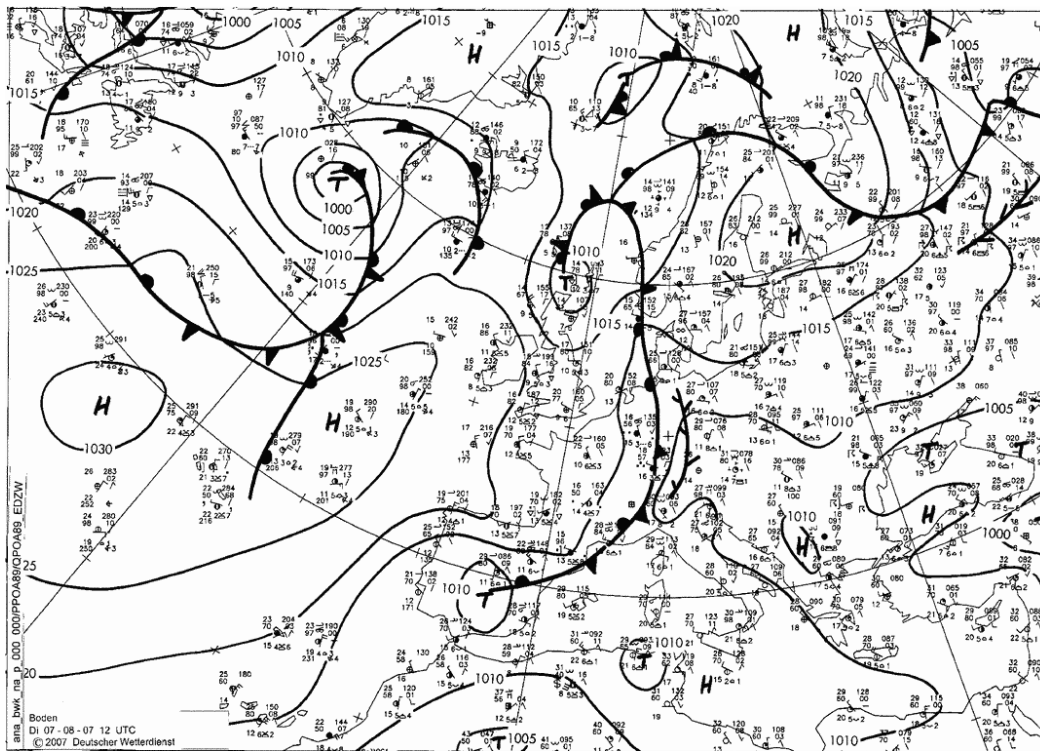
Epizoda 1. 8. - 3. 8. 2007



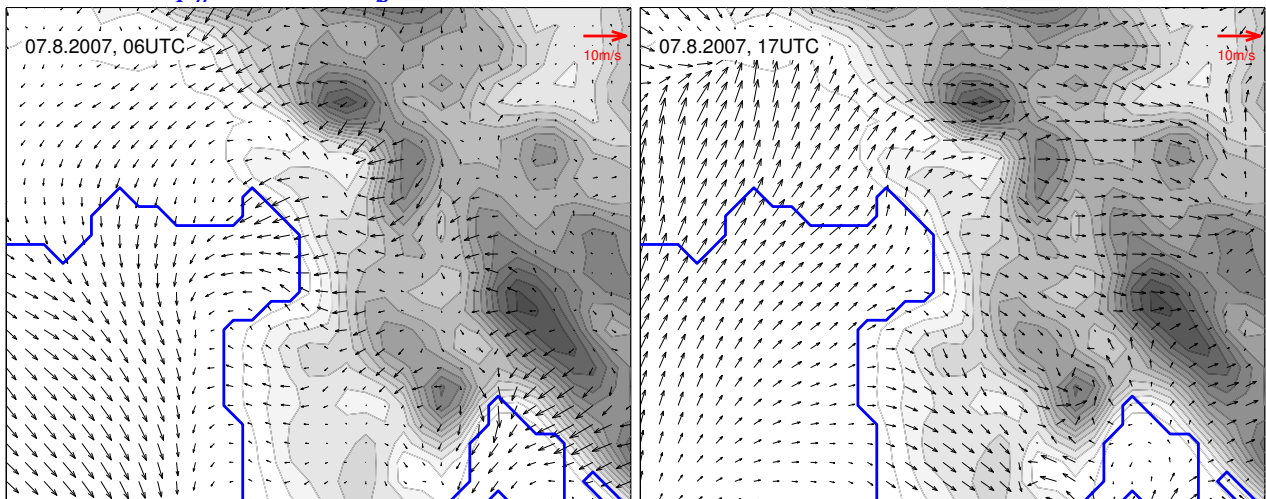
Slika 16: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 1. 8. - 3. 8. 2007.

Koncentracija ozona na postaji Lovran ima dva manj izrazita maksimuma v popoldanskem času prvega in drugega dne. Drugi maksimum je dobro koreliran s transportom prekursorjev iz Kopra in Trsta v pretekli noči. Tudi transport onesnaženja iz Ljubljane okoli 30. ure je lepo viden na poteku in prav tako lahko razloži del izmerjenih koncentracij. Sredi noči, po 48 urah simulacije, je opaziti tudi advekcijo onesnaženja iz Umaga, vrhovi v koncentraciji onesnaženja iz Tržiča pa časovno sovpadajo z maksimumi koncentracije ozona, kar ponovno navaja na sklep, da iz Tržiča v Lovran prihaja že z ozonom onesnažena zračna masa.

Epizoda 5 8. - 8. 8. 2007



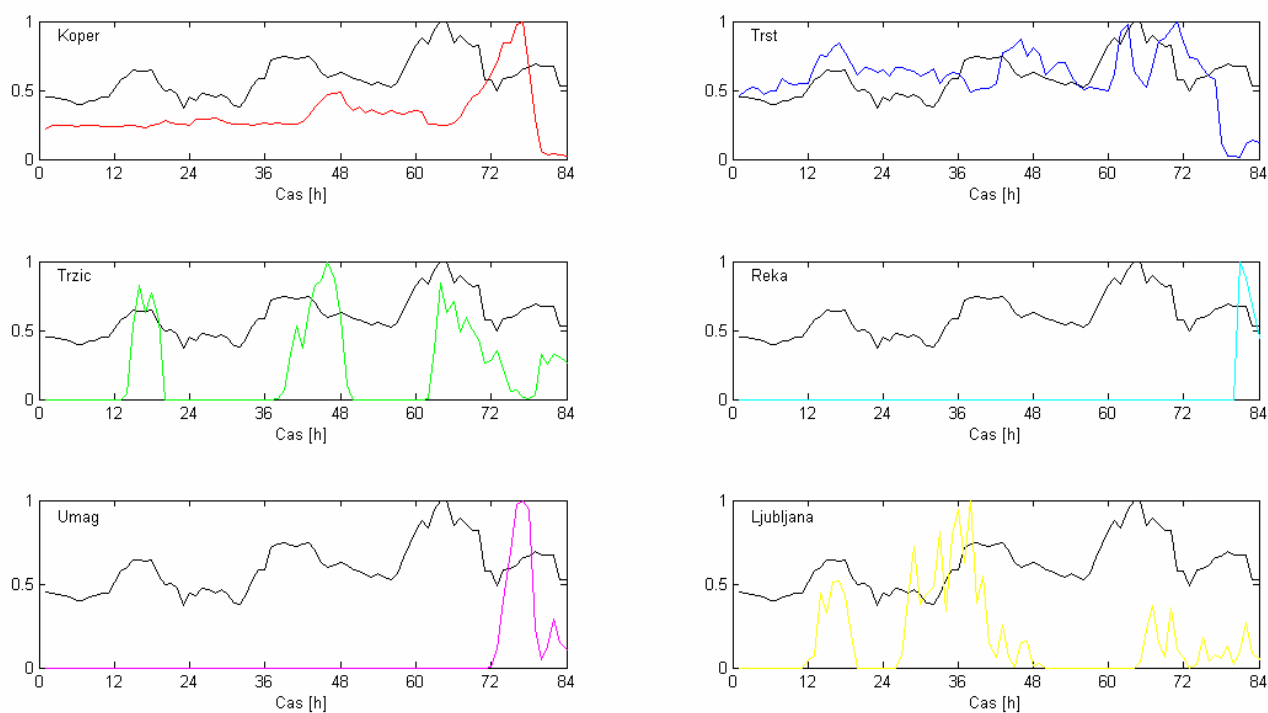
<http://www.wetter3.de/fax>



Slika 17: kot slika 3, le za 7. avgust 2007 ob 06UTC (levo) in 17UTC (desno).

V polju vetra tudi v tej situaciji ni izrazitega vzorca, razen nočne in jutranje obalne cirkulacije s kopnega na morje in maestrała v popoldanskem času.

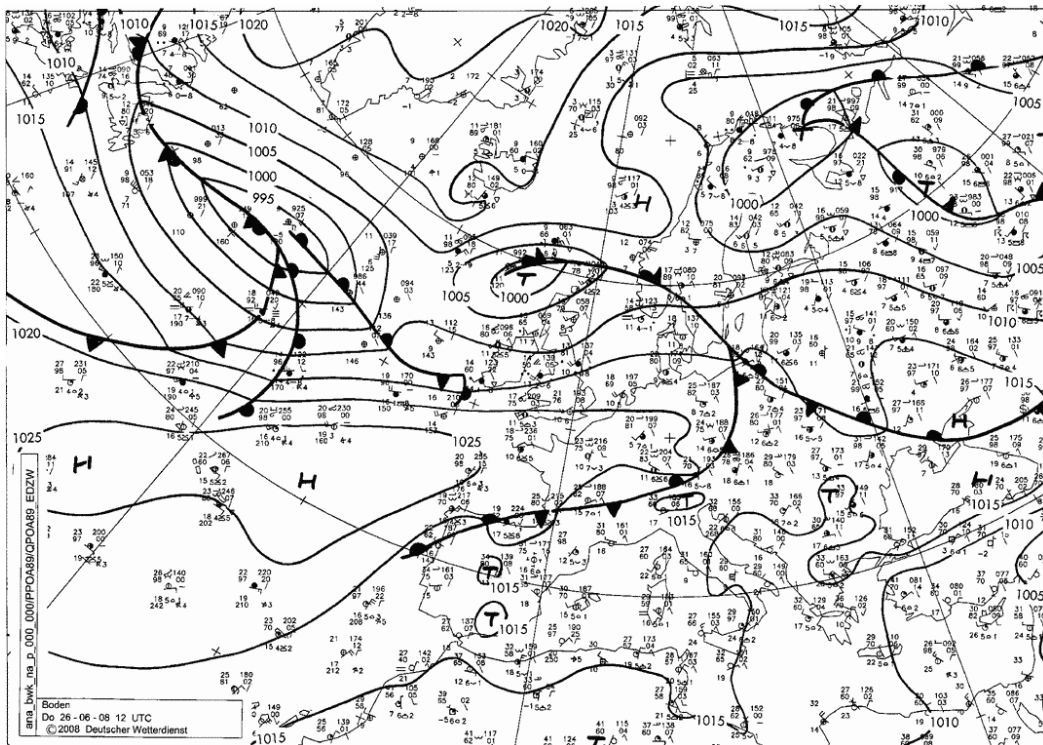
Epizoda 5. 8. - 8. 8. 2007



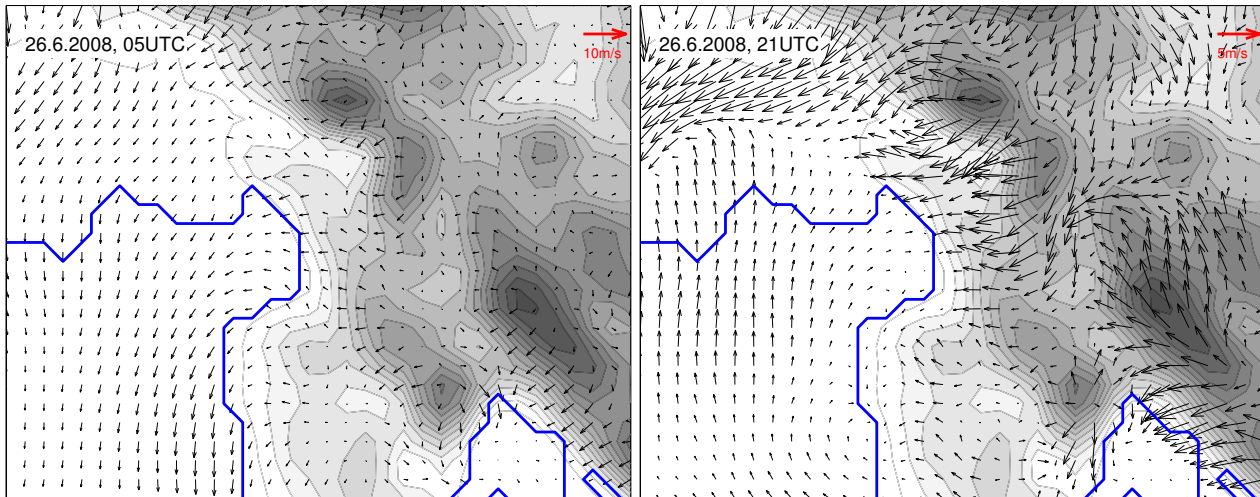
Slika 11: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 5. 8. - 8. 8. 2007.

V tej epizodi je morda najizraziteje opazen direkten prispevek virov v Tržiču na povišane koncentracije ozona v Lovranu, saj advektirana zračna masa iz Tržiča skoraj natanko časovno sovpada z visokimi koncentracijami izmerjenega ozona. Tudi prispevek bližnjih virov ni zanemarljiv, zanimivo pa je, da v tem primeru ni opaziti izrazitejšega 12-urnega faznega zamika onesnaženja iz Trsta, kot v nekaterih ostalih epizodah.

Epizoda 18.6. - 28. 6. 2008



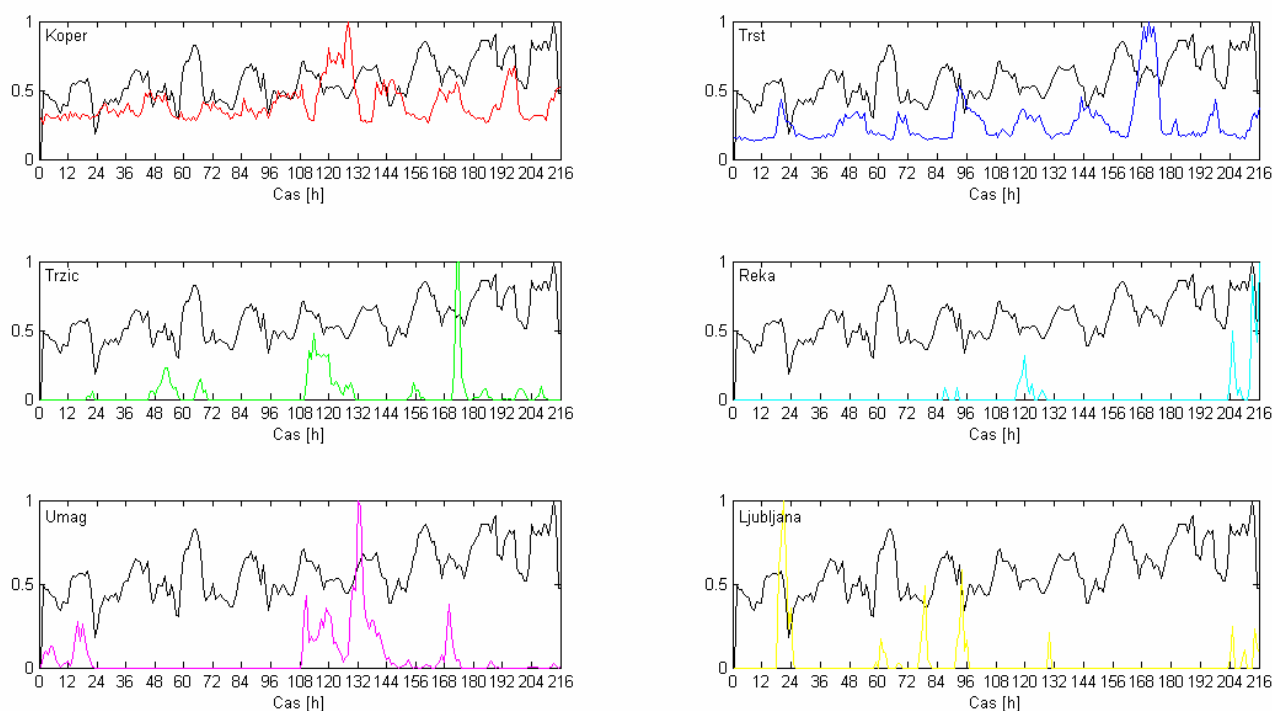
<http://www.wetter3.de/fax>



Slika 19: kot slika 3, le za 26. junij 2008 ob 05UTC (levo) in 21UTC (desno).

Vetrovno polje na dan izrazito visoke izmerjene koncentracije ozona kaže na prihod burje v večernem času. Pred tem je bil veter izrazito šibak, popoldne je bila ob obali celo stagnacija.

Epizoda 18. 6. - 28. 6. 2008



Slika 20: Primerjava modelirane in izmerjene koncentracije za epizodo 18. 6. - 28. 6. 2008.

Tudi v tej epizodi, podobno kot med 12. in 24. julijem 2007, je imela izmerjena koncentracija ozona lepo viden dnevni hod. Tudi transport onesaženja iz Kopra in Trsta je imel takšen dnevni hod, s faznim zamikom, relativna pomembnost enega ali drugega prispevka pa se je iz dneva v dan spreminjala.

Sklep

Na osnovi simulacij z numeričnim meteorološkim modelom ALADIN in naknadno s transportnim modelom FLEXPART ugotavljamo, da je v opisanih devetih epizodah z največjimi izmerjenimi koncentracijami ozona na postaji Lovran šlo *večinoma za vpliv bližnjih virov*, v Kopru in Trstu. V prid temu govorijo močno korelirane vrednosti modelirane koncentracije onesaženja iz vnaprej določenih virov z izmerjenim potekom koncentracije ozona. Najbolje je ta mehanizem viden na slikah 12 in 20. Neposredni *vpliv bolj oddaljenih virov je občasen*. V nekaterih situacijah smo uspeli del izmerjenih koncentracij pripisati virom v Trziču, redkeje tistim v Umagu. Zanimivo pri teh srednje oddaljenih vplivih pa je, da v teh primerih ni opaziti 12-urnega zamika med koncentracijami modeliranih in izmerjenih vrednosti, kar najbrž pomeni, da je v zračni masi, ki v Lovran pride iz Trziča oziroma Umaga že prisoten ozon.

Literatura

Stohl, A., M. Hittenberger, and G. Wotawa (1998): Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiments. *Atmos. Environ.* **32**, 4245-4264