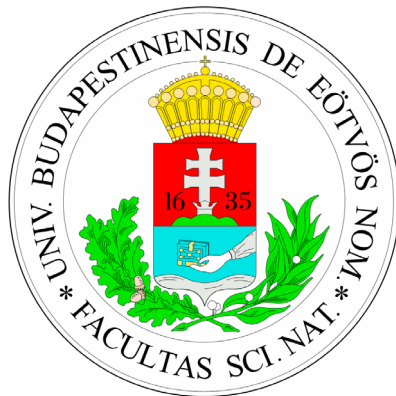


A SZÉN-DIOXID KONCENTRÁCIÓ VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA EURÓPAI TORONYMÉRÉSEK ADATAI ALAPJÁN

Diplomamunka

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
METEOROLÓGIAI TANSZÉK



Készítette:

SZABÓ TAMÁS

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Témavezetők:

DR. BARCZA ZOLTÁN

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

DR. HASZPRA LÁSZLÓ

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Országos Meteorológiai Szolgálat

Budapest, 2007

Tartalomjegyzék

TARTALOMJEGYZÉK	- 2 -
1. BEVEZETÉS	- 3 -
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	- 6 -
3. FELHASZNÁLT MODELLEK ÉS ADATOK.....	- 8 -
3.1. HYSPLIT_4	- 8 -
3.2. FLEXTRA.....	- 9 -
3.3. ECMWF	- 9 -
3.4. HY_PROGRAMCSOMAG	- 10 -
4. KONCENTRÁCIÓ HATÁSTERÜLET	- 10 -
4.1. MATEMATIKAI LEÍRÁS	- 12 -
4.2. ESETTANULMÁNYOK.....	- 15 -
4.2.1. 2003. ÁPRILIS 11.....	- 16 -
4.2.2. 2003. DECEMBER 6.	- 18 -
4.2.3. 2003. DECEMBER 14.....	- 20 -
4.3. KÖVETKEZTETÉSEK	- 22 -
5. SZÉN-DIOXID TÉRKÉP	- 23 -
5.1. MATEMATIKAI LEÍRÁS	- 24 -
5.2. SZÉN-DIOXID TÉRKÉP KÉSZÍTÉSÉNEK SZEMLÉLTETÉSE.....	- 27 -
5.3. EDGAR.....	- 30 -
5.4. CO ₂ MÉRŐÁLLOMÁSOK	- 31 -
5.4.1. CABAUW	- 32 -
5.4.2. HEGYHÁTSÁL	- 34 -
5.4.3. KASPROWY WIERCH.....	- 36 -
5.4.4. PALLAS.....	- 38 -
5.5. SZŰRÉSEK.....	- 40 -
5.6. EGYEDI CHART	- 41 -
5.7. MULTICHART.....	- 49 -
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	- 53 -
7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	- 54 -
IRODALOMJEGYZÉK.....	- 55 -

1. Bevezetés

Korunk egyik legnagyobb kihívása, hogy megértsük a klímaváltozás fő okozójaként ismert üvegházgáz, a szén-dioxid (CO₂) globális körforgalmát és előrejelezzük megváltozását.

A 20. század első felében ugyan elszórtan már végeztek méréseket, azonban ezek – pontatlanságuk miatt – még nem jelezték a szén-dioxid koncentráció növekedését. A napjainkban is használt megbízható, elegendően pontos mérési módszert C. D. Keeling fejlesztette ki a múlt évszázad derekán (Haszpra, 2005). Ezzel a módszerrel már ki lehetett mutatni a légköri koncentráció növekedését, az emberi tevékenység hatását.

Az elmúlt pár évszázadban az emberiség egyre több fosszilis tüzelőanyagot égetett el a növekvő energiaigény kielégítésére. A világ számos pontján, köztük az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által Magyarországon végzett mérések bizonyítják (Haszpra, 1999a), hogy a légköri üvegházhatásban kulcsszerepet játszó szén-dioxid koncentrációja évtizedek óta fokozatosan nő. Ismert, hogy az emberi tevékenység révén évente körülbelül 7 Pg szén kerül a légkörbe szén-dioxid formájában (IPCC, 2001). Az antropogén forrásokból a légkörbe jutó szén-dioxid mennyiség nagyjából fele a levegőben marad, folyamatosan növelve a légköri szén-dioxid koncentrációt. A másik fele az óceánokba, illetve a bioszférába kerül (IPCC, 2001).

Hazai és amerikai mérési adatok felhasználásával is megállapították, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció évszakos ingadozása a szárazföldi területekről távolodva egyre kisebb mértékű és fázisában egyre késleltetettebb (Haszpra, 1995). Továbbá kiderítették, hogy a szén-dioxid koncentráció növekedési ütemében tapasztalható ingadozások a szárazföldi területeken a legnagyobbak és időben is előbb jelentkeznek, mint a szárazföldtől távoli, óceáni és sarkvidéki területeken. Ráadásul a növekedési ütem nem mutat szoros kapcsolatot az antropogén kibocsátás alakulásával. Mindez alátámasztotta a modelleredményeket, miszerint a légkör szén-dioxid háztartását valószínűleg a mérsékelt övi kontinentális ökológiai rendszerek vezérlik. A gyors ütemben bővülő globális CO₂ megfigyelő hálózat adatainak értékelése és az egyre pontosabbá váló légköri transzportmodellek alkalmazása ellenére a mai napig sem ismerjük kielégítő pontossággal a CO₂ koncentráció alakításában résztvevő folyamatokat. Emiatt fontos, hogy lokális skálán is végezzünk vizsgálatokat, és a mérési adatok elemzésével, illetve nagyobb térskálára való kiterjesztésével jobban megértsük a koncentráció változásának fizikai okait.

A szén-dioxid légköri tartózkodási ideje elegendően hosszú ahhoz, hogy többé-kevésbé egyenletesen elkeveredjen a Föld teljes troposzférájában. Koncentrációja a forrásterületektől eltekintve mindenütt nagyjából azonos, csekély eltéréssel az antropogén forrásokban bővelkedő északi és a kevésbé szennyezett déli félgömb között. Éppen ezért kezdetben a mérőállomásokat minden CO₂-forrástól/nyelőtől távol óceáni szigetekre, magas hegycsúcsokra, sarkvidéki területekre telepítették, hogy ott helyi zavaró hatások nélkül mérhessék a légkörben lezajló globális változásokat. Több mint egy évtizede merült fel, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció alakulásában a kontinentális ökológiai rendszerek meghatározó szerepet játszhatnak, tehát a mechanizmusok vizsgálatára ezeken a területeken is célszerű mérőhálózatot fejleszteni (Haszpra, 1999a; Tans, 1991).

Hegyhátsálon 1994 végén kezdődtek meg dr. Haszpra László kezdeményezésére a légköri szén-dioxid koncentráció mérések az ott lévő TV-adótorony felhasználásával. Itt 10 és 115 méter között, négy szinten folyik a szén-dioxid koncentráció és az alapvető meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, légnedvesség, szélsébség) folyamatos mérése (Haszpra, 1999b; Haszpra és Barcza, 2001a,b; Haszpra et al., 2001). A mérés lehetővé teszi, hogy kontinentális területen, aktív vegetáció jelenlétében vizsgáljuk a légköri szén-dioxid mennyiségének időbeli alakulását, valamint jobban megértsük a térség szén-dioxid háztartását, benne a helyi hatások és az advekciónak a szerepét. A felszíntől távolodva már nem csak a helyi hatások befolyásolják a mért szén-dioxid koncentrációját, hanem az oda érkező légréteg története, vagyis korábbi pályája is fontos. Egy példával szemléltetve: nem tehetjük meg, hogy egy, a Ruhr-vidék felől érkező légréteg mérési eredményét ugyanúgy értelmezzük, mintha az a tátrai erdőségeken haladt volna keresztül, vagy esetleg az Adriai tenger térségéből érkezett volna.

Jelen diplomamunkában bemutatok egy módszert, amellyel lehetőség nyílik a szén-dioxid koncentráció mérések helyszínére érkező légtömegek eredetének, illetve hatásának feltárására, így ennek segítségével rövidebb-hosszabb időintervallumokra meghatározható az a terület, ahonnan a mért CO₂ jel változékonysága származik.

Az elemzésekhez légköri méréseken alapuló, reális, a háromdimenziós szélmezőt minél pontosabban leíró adatbázisra, valamint egy olyan modellre van szükségünk, amely képes a levegőelemek mozgását a széladatok segítségével leírni, valamint meghatározni a planetáris határréteg magasságát.

A fenti igényeknek megfelelően a dolgozat 3. fejezetében bemutatok azokat a gyakorlatban használható modelleket és adatbázisokat, amelyek megfelelnek a fenti elvárásoknak, és amelyeket a koncentráció-változások vizsgálatánál felhasználok. Egzakt matematikai leírást adok az ún. koncentráció hatásterület függvény meghatározására. Ezután

három meteorológiai helyzet elemzésével megvizsgálom, hogy a légtömegek cseréje hogyan hat a CO₂ koncentrációra Hegyhátsálon. Az elemzés rámutat a hatásterület vizsgálatok hiányosságára, nevezetesen arra, hogy a földrajzi régió definiálásán túl egyéb kiegészítő információ (pl. növényi szénháztartás modell) hiányában nem tudunk több hasznos információt kinyerni a modell segítségével.

Ahhoz, hogy túllépjünk a koncentráció forrásterület meghatározásán, és megoldást kínáljunk a fenti problémára, bemutatok egy olyan módszert, amellyel megvalósul a levegőelemek pályájának és a mért koncentráció értékeknek az összekapcsolása. Az eredmény egy speciális, ún. CO₂ térkép (angolul „chart”), amely kontinentális térskálán is alkalmazható a CO₂ transzportfolyamatok vizsgálatára. Dolgozatom második felében bemutatom a CO₂ térkép elkészítéséhez szükséges matematikai alapokat, majd az Európa több pontján végzett szén-dioxid koncentráció-mérések, illetve a FLEXTRA trajektória modell adatainak összekapcsolásával kapott eredményeimet mutatom be. A CO₂ térkép megalkotásával és a térkép adatainak elemzésével egy lépést tettünk afelé, hogy jobban megismerjük, megmagyarázzuk azokat a folyamatokat, amelyek a CO₂ koncentráció alakításában részt vesznek

2. Irodalmi áttekintés

A légköri transzportfolyamatok leírásának egyik legfontosabb eszköze a légrészecskék által követett útvonal, azaz a trajektória meghatározása. A trajektóriák számításához meteorológiai adatokra, valamint az adatokat felhasználó modellre van szükségünk. A trajektória-modell kiválasztásánál elsődleges szempont, hogy a modell validált legyen, vagyis bizonyítottan nagy pontossággal írja le a légköri transzportfolyamatokat.

A numerikus prognosztikai modellek alapvetően egy adott kiindulási helyzetből időbeli integrálással számítják ki adott időlépcsőnként az előre jelzett meteorológiai mezőket. Forward trajektóriák esetén hasonló módon, időben előre számolva, az előre jelzett mezők alapján (ha a múlttól van szó, akkor már meglévő mezőket felhasználva) számolják ki, hogy egy adott pontból induló légrészecske milyen útvonalat követ haladása során. Backward (időben visszafelé számított) trajektóriák esetén már meglévő időjárási mezők alapján azt számolják ki, hogy honnan, milyen útvonalat követve jutott el a légrészecske egy megadott pontba, megadott időre.

Hazánkban már az 1950-es években megkísérelték meghatározni a levegőelemek pályáját szubjektív grafikus eljárásokkal (Tóth, 2000). Magyarországon a 80-as évek közepén készítettek szélesebb körben használt trajektória-modellt (Iványi és Mersich, 1984). A 90-es években már kétdimenziós izentróp és izobár trajektória számítások is folytak (Ihász, 1992), valamint az 1986-os csernobili és az 1998 májusában történt Accronix-i nukleáris balesetet is vizsgálták trajektória modellszámításokkal is (Duska et al., 1998).

Hurwitz és munkatársai (2004) megmutatták, hogy különböző légtömegek kicserélődésének hatására ugrásszerű változás léphet fel nemcsak a meteorológiai paraméterekben (légnedvesség, hőmérséklet, stb.), hanem ezzel szoros összefüggésben a légköri CO₂ koncentrációban is. A fenti tanulmány szinte egyedülálló a szakirodalomban, megállapításait egy Egyesült Államokbeli mérőhely adatai alapján teszi. Diplomamunkámban hasonló elemzést végzek a hegyhátsági toronymérés adatai alapján, de a vizsgáldást kibővítem a koncentráció hatásterületek¹ megváltozásának vizsgálatával is.

2002-ben Finnországban már végeztek tanulmányokat a szén-dioxid térkép (illetve más szennyezőanyagok esetén szennyezőanyag térkép) felhasználásával. Aalto et. al (2002) 4 éves mérési periódus alapján készített szennyezőanyag térképeket egy Észak-Finnországban,

¹ A koncentráció hatásterület pontos definícióját lásd később.

boreális területen elhelyezkedő obszervatórium adatainak felhasználásával. A szén-dioxid mellett koromra, más aeroszol alkotókra, ózonra és kén-dioxidra is végeztek vizsgálatokat, majd a kapott térképeket összevetették más állomások adataival. Napi 4 (0 UTC, 6 UTC, 12 UTC, illetve 18 UTC érkezési időpontú) 120 órás backward-trajektória adatok alapján végeztek számításokat. A trajektóriák pontjai 6 óránként álltak rendelkezésre. A koncentráció térképek – ahogyan az általunk használt módszerben is – a trajektóriák és a mért adatok összekapcsolásával készültek. Azonban különbözőképpen kezelték a szén-dioxidot, az ózont, melyek koncentrációja normális eloszlásúnak tekinthető, illetve a kondenzációs magvakat, a kormot és a kén-dioxidot, melyek koncentrációja log-normális eloszlású. A tanulmányok során $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ -os rácsfelbontással dolgoztak.

Olasz kutatók 2002-ben hasonló módszer segítségével végeztek vizsgálatokat Európára és Észak-Afrikára, valamint a kutatásukban kiemelkedő szerepet kapott az Atlanti-óceán északi része is (Ferrarese et al., 2002). A szén-dioxid térkép elkészítéséhez szükséges trajektóriákat az ECMWF (European Centre of Medium-range Weather Forecast, azaz Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ) szélmezői alapján a T213/L31 felbontású operatív modellel számították ki. A számítások során két magashegyi obszervatórium szén-dioxid koncentráció adatait használták fel, melyek már a szabad troposzférában fekszenek, és távol vannak az antropogén hatásoktól.

Az olasz kutatócsoport 2003-ban kétéves (1996-97) mérési időszakot felhasználva végeztet további kutatásokat. Az előző módszert továbbfejlesztve immár három mérőállomás adatait használták fel (Apadula et al., 2003). A Stohl által kifejlesztett statisztikai forrás-orientált módszert (Stohl et al., 1996) módosították néhány algoritmussal, mellyel csökkentették a modell bemenő adatokra való érzékenységét.

Mindhárom szakirodalmi forrásra igaz, hogy 120 órás backward trajektóriákkal dolgoztak, ami más szerzők szerint helytelen, mivel a trajektóriák pontossága legfeljebb 72 óráig elfogadható (Kahl et al., 1989; Draxler, 1996). Jelen dolgozatban azonban a chart számítások során véleményünk szerint ennél pontosabb adatokra van szükség, emiatt a futtatások során a trajektóriáknak csak a legpontosabbnak tekinthető első 36 óráját használtuk.

3. Felhasznált modellek és adatok

3.1. HYSPLIT_4

Dolgozatom első felében a levegőelemek pályájának (trajektóriájának) megismerése céljából a HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) modellt használtam. Ezt a modellt az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Hivatal Légkör-kutató Laboratóriuma (NOAA ARL) fejlesztette ki és tette nyilvánosan elérhetővé. Megfelelő átalakítás után a modell más forrásból származó adatbázissal is képes működni (pl. ECMWF).

A HYSPLIT modell olyan komplett programrendszer, amely egyszerű trajektóriáktól kezdve akár szennyezőanyag terjedést és ülepedést is tud szimulálni.

A HYSPLIT modell több mint két évtizedes fejlesztése során több fontos állomáson ment keresztül. Az első verzió (Draxler és Taylor, 1982) még csak rádiószondás megfigyeléseken alapult, valamint a diszperziós része nappal egyenletes átkeveredést, éjszaka pedig a keveredés megszűnését tételezte fel. A szélnyírás okozta terjedések számításához éjszakára be kellett vezetni a nappali réteg vékonyabb rétegekre való feldarabolódását. A következő verzióban (Draxler és Stunder, 1988) már változó keveredési erősséget vezettek be, ami térbeli és időbeli keveredési profilon alapult. Az ezt követő változatban (HYSPLIT_3 - Draxler, 1990; 1992) a rádiószondás adatok használatát lecserélték más adatanalízisből származó, rácson tárolt meteorológiai adatokra, vagy numerikus időjárás-előrejelző modellekből kapott rövid távú előrejelzésekre. A jelenlegi verzió (HYSPLIT_4 - Draxler és Hess, 1997) néhány fontos jellemzővel bővült. A két legfontosabb újdonság az, hogy az advekciós algoritmus időbeli interpolációval egészült ki, valamint egy háromdimenziós részecske-diszperzió rutin került be a koncentráció-számításba. A modell adaptálásáról részletesebb leírás olvasható egyik korábbi TDK munkámban (Szabó, 2004).

A szakirodalomban e modell felhasználására nagyon sok példát találhatunk. Többek között a HYSPLIT_4 modellt használták a Shenandoah Nemzeti Parkban a szennyezett és a tiszta levegő eredetének vizsgálatára (Moy et al., 1994), és Mauna Loa-n, hogy meghatározzák az odaérkező légtömeg eredetét (Hahn et al., 1992). A sarki területek fölé érkező levegő pályáját is vizsgálták már vele (Shipman et al., 1992), valamint használták már New England-re, hogy megvizsgálják a város tengerparti oldalánál keletkező köd légtömegének eredetét (Klemm et

al., 1994). A HYSPLIT_4 segítségével végeztek már olyan kutatást is, amelyben koncentráció-forrásterület meghatározására használták fel a modellt (Gloor et al., 2001).

3.2. FLEXTRA

A FLEXTRA (Stohl et al. 1995, 1998) trajektória modell a terjedési modellek családjának egyik legmodernebb, széles körben használt tagja, mely ötféle trajektóriát képes számolni, forward (időben előre történő) és backward (időben visszafelé történő) módon. A 3D-s és az izentróp trajektóriákon kívül számol trajektóriákat a keveredési rétegben, az időjárás-előrejelző modellek modellszintjeire és a hagyományos izobár szintekre.

Diplomamunkám második felében a FLEXTRA legújabb, 3.3-as változatával készített másfél napos backward trajektóriákkal dolgoztam, egy óránként rendelkezésre álló óras felbontású trajektória adatokkal. A FLEXTRA modell eredményeit a Finn Meteorológiai Szolgálat munkatársai bocsátották rendelkezésünkre egy finn-magyar együttműködés keretén belül.

3.3. ECMWF

A trajektória számításokhoz az ECMWF archív analízis és rövid távú előrejelzési adatbázisát használtuk fel.

Mivel a HYSPLIT számára ez utóbbi adatbázis nem volt megfelelő formátumú, így a használata előtt konvertálásra volt szükség. Az általunk elérhető ECMWF adatbázis 37 hibrid nyomási szinten tartalmaz adatokat (3 dimenziós szélvektor, hőmérséklet, stb.), térbeli felbontása $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$, az időbeli felbontása pedig 3 óra. 0 h és 12 h UTC időpontokban analízis mezők állnak rendelkezésünkre, míg a köztes időszakot rövid távú előrejelzés mezők töltik ki.

A FLEXTRA modell futtatásához felhasznált meteorológiai adatbázis térbeli felbontása $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, időbeli felbontása 3 óra volt.

Az adatokat az ECMWF operatív előrejelzési modellje állítja elő, lekérdezésük a MARS adatbázisból történt (<http://www.ecmwf.int/services/archive/>) az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársainak segítségével, illetve a Finn Meteorológiai Szolgálat munkatársai által.

Vizsgálatainknál nagy hangsúlyt fektettünk a trajektória-számítások pontosságára.

3.4. HY_ Programcsomag

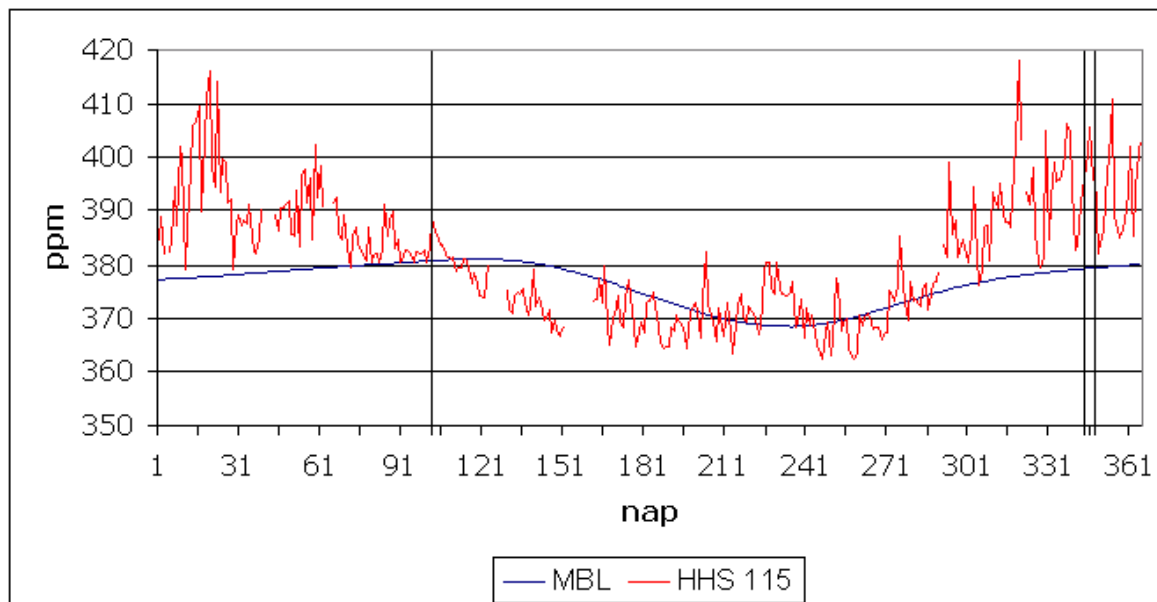
Az elemzésekhez jelentős segítséget nyújtott az általam korábban kifejlesztett és bemutatott programcsomag (Szabó, 2004), melynek segítségével képes voltam a vizsgálatokhoz szükséges trajektóriák gyors elkészítésére, illetve koncentráció hatásterületek számítására. Mivel a koncentráció hatásterület kifejezés okot adhat félreértésre, a következő fejezetben megadom a hatásterület definícióját és részletesen leírom a meghatározásához szükséges matematikai alapokat.

4. Koncentráció hatásterület

A troposzférában a horizontális légmozgások sebessége a magasság növekedésével általában növekszik. Az áramlások a szabad troposzférában frontmentes időben általában laminárisak, frontok, jetek, illetve kisebb skálájú, gyors mozgású légköri képződmények környezetében válnak turbulenssé. A turbulens jellegű áramlások elősegítik a légköri alkotóelemek, nyomgázok, szennyező anyagok intenzívebb elkeveredését is. A troposféra (koncentráció-eloszlás szempontjából) két rétegből tevődik össze: ezek a nagyjából homogénnek tekinthető légköri vagy planetáris határréteg (PHR) és a szabad troposféra (Stull, 1988). A határréteg magassága a földrajzi szélességtől és évszaktól függően néhány száztól néhány ezer méter lehet. E fölött helyezkedik el a szabad troposféra. A határréteget intenzív függőleges turbulens mozgások homogenizálják (kevert réteg). Ez a réteg az átkeveréshez energiát adó besugárzás megszűnése után sem szűnik meg, csak kettébomlik. Alsó részéből kialakul a mechanikus turbulencia (szél) által továbbra is átkevert éjszakai határréteg (ahol a különböző nyomanyagok felhalmozódhatnak), felette pedig a felszíntől immár elzártan ott marad a tárolási réteg (angolul „residual layer”), amelynek összetétele így a nappali határréteg összetételét tükrözi. Kémiai folyamatok természetesen itt is folynak, de felszíni nyomanyag bevitel, illetve száraz ülepedés nincs. A határréteg azonban nem teljesen zárt, mivel a határréteg a nappali növekedése révén szabad troposzférikus levegőt kebelez be. Emellett a határréteget áttörő erős konvekció függőleges nyomanyag-transzportot vezet, illetve az időjárási frontok intenzív légcserét biztosítanak a szabad troposzférával.

Jelenlegi ismereteink szerint a szabad troposzférában a szén-dioxid egyenletesebben oszlik el, mint a planetáris határrétegben, mivel a határréteg egyfajta elválasztó felületként működik a felszínközeli levegő és a szabad légkör között: nem, vagy csak lassan engedi átkeveredni a levegőt a határréteg és a szabad troposféra közt. A CO₂ forrásai és nyelői túlnyomórészt a határrétegen belül helyezkednek el (ez alól kivételt képez pl. a légi közlekedés, vagy a szén-monoxid oxidációja). A források és a nyelők így különböző skálájú koncentráció-gradienseket hoznak létre a határrétegben, míg a határfelület létezése miatt a szabad troposzférikus CO₂ az ott uralkodó erősebb áramlatok hatására el tud keveredni – legalábbis zonálisan. Cotton et al. (1995) kimutatta, hogy globális átlagban a határréteg levegője 4 naponta cserélődik ki szabad troposzférikus levegővel, tehát hosszabb időskálán a vertikális keveredés fontos szerepet kap.

A záróréteg fennállása miatt, és a bioszféra éves dinamikájának hatására az év szinte minden napján CO₂ koncentráció-különbség áll fenn a határréteg és a szabad troposféra közt. Az Egyesült Államokbeli NOAA/ESRL Global Monitoring Division (a korábbi Carbon Monitoring and Diagnostics Laboratory, <http://www.cmdl.noaa.gov/>) évente elkészít egy ún. tengeri határréteg mátrix (Marine Boundary Layer – MBL – matrix) adatbázist (GLOBALVIEW-CO₂, 2003), amellyel a Föld tetszőleges pontján, az év bármely időszakában közelíteni lehet a szabad troposféra CO₂ keverési arányát.



4.1. ábra: 2003 során az MBL koncentráció illetve a hegyhátsági mérőhely 115 méteres szintjén mért kora délutáni szén-dioxid koncentráció éves menetének összehasonlítása. (A három függőleges vonal a 3. fejezetben tárgyalt esettanulmányok időpontját jelöli)

Az 4.1. ábra mutatja Hegyhátsál esetén a 115 m-en mért kora délutáni (átkevert körülmények között mért) CO₂ koncentráció és a Hegyhátsál földrajzi szélességének megfelelő MBL keverési arány értékeit 2003-ra vonatkozóan. Mivel a 115 m-es szinten mért adatok a kora délutáni órákban jól közelítik a határréteg átlagos CO₂ keverési arányát, az ábra jól szemlélteti a fennálló gradienst. Ez a koncentráció különbség tehát valamilyen módon meg kell jelenjen a mért CO₂ koncentráció adatsorban, amikor pl. frontfelületek mentén szakadás keletkezik a határréteg lezáró tartományában, és levegőcsere történhet a szabad troposzférával.

A fenti egyszerű modell felvázolása után végezzünk el egy gondolatkísérletet. Képzeljünk el egy fiktív levegőelemet, amely a szabad troposzférában mozog a nagytérségű áramlatok hatására. A levegőelem valamilyen folyamat hatására (pl. a határréteg magasságának növekedése közben) áthalad a határréteg tetején elhelyezkedő inverziós tartományon, és továbbhalad a határrétegen belül. Ekkor az ott fennálló, kisebb skálájú keverési arány változások elkezdnek nyomot hagyni a levegőelemre jellemző CO₂ keverési arányban. Ha pl. a levegőelem egy antropogén kibocsátástól mentes, jó vízellátottságú erdős terület felett halad át a vegetációs időszakban, napsütéses időben, akkor az erdő intenzív szén-dioxid felvétele miatt csökkenni fog a levegőelemre jellemző koncentráció. Ezzel szemben ipari terület felett áthaladva ugrásszerűen megnőhet a levegőelemre jellemző koncentráció. Komplikálja a helyzetet, hogy éjszaka a levegőelem a planetáris határréteg tárolási réteg elnevezésű részébe is bekerülhet (Stull, 1988). Itt a levegőelem tulajdonságait nem változtatják meg a felszíni hatások, szabad troposzférikus hatás azonban érheti a levegőelemet. A levegőelem pályája egy adott pillanatban keresztezi a mérőállomást: ekkor a műszereink egy bizonyos koncentrációt fognak mérni. Felmerül a kérdés, mi okozta azt, hogy az adott levegőelem a mért koncentrációban tartalmaz szén-dioxidot? E kérdés megválaszolásában lehet segítségünkre a koncentráció hatásterület meghatározása.

Koncentráció hatásterületnek (angolul „footprint” vagy „region of representativeness”) azt a földrajzi térséget nevezzük, mely terület szén-dioxid kibocsátásáról, illetve elnyeléséről a mérés helyszínére érkező levegő információt hordoz.

4.1. Matematikai leírás

A koncentráció hatásterület számítása során definiálunk egy, a szélességi és hosszúsági körök mentén szabályos lépésközű, véges tartományú rácsot ($V_{i,j}$) a vizsgálni kívánt terület

felett (K-Ny-i irányban X , É-D-i irányban Y darab rácsponttal). Az egyes rácspontok koordinátáit (földrajzi szélesség, hosszúság) a következő módon jelöljük:

$$\overline{P}_{i,j} \quad i \in [1, X], \quad j \in [1, Y]. \quad (1)$$

Kezdetben a hatásterület minden cellájának értéke zérus:

$$V_{i,j} = 0 \quad i \in [1, X], \quad j \in [1, Y]. \quad (2)$$

A mező számítása során Gloor és munkatársai vizsgálatai alapján a következő függvénnyel súlyozzuk a trajektóriákat:

$$f(t) = 1 - e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

ahol t az adott trajektória aktuális időpillanatát jelenti. Gloor et al. (2001) vizsgálata alapján $\tau = 26,2$ óra, amelyet a tanulmány szerzői egy Egyesült Államokbeli magas torony alapú C_2Cl_4 keverési arány mérés alapján, a HYSPLIT modell felhasználásával határoztak meg. Jelen munkámban feltételezem, hogy a módszer európai körülmények közt is alkalmazható.

Tekintsünk N darab L órás backward trajektóriát, amelyeket az óránként eltárolt 3 dimenziós csomópontok definiálnak. A trajektóriák összes csomópontját hozzárendeljük a hozzájuk legközelebb eső rácsponthoz:

$$V_{a,b} = V_{a,b} + f(t) \quad i \in [1, N], \quad t \in [0, L], \quad (4)$$

$$Z_{a,b} = Z_{a,b} + 1 \quad i \in [1, N], \quad t \in [0, L], \quad (5)$$

ahol $Z_{a,b}$ az adott rácsponton átmenő trajektóriák számával lesz egyenlő, a és b pedig úgy vannak megválasztva, hogy igaz legyen a következő összefüggés:

$$\overline{P}_{a,b} - \overline{T}_{i,t} = \min. \quad (6)$$

Itt $\overline{T}_{i,t}$ az i . trajektória t . időpillanatban felvett koordinátáit jelenti.

Ezt követően a definiált rács minden egyes cellájában szereplő értéket osztjuk az adott cellán keresztülhaladt trajektóriák számával (Gloor et al., 2001):

$$W_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{Z_{i,j}} \quad i \in [1, X], \quad j \in [1, Y], \quad Z_{i,j} \neq 0. \quad (7)$$

Az így kapott eredményt ($W_{i,j}$) ábrázolva kapjuk a koncentráció hatásterületet (4.2. ábra). Az ábrán az izovonalakat súlyozás szerinti eloszlás alapján rajzoltuk meg (4.1. táblázat).

Az 1%-os vonal által határolt terület azokat a cellákat jelenti, ahol a cellában szereplő érték legalább 1%-a a felhasznált trajektóriák számának (N).

Definiáltuk a koncentráció hatásterület középpontját (\bar{K}), amit a következő egyenlet definiál:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y \overline{P_{i,j}}}{F} \quad i \in [1, X], \quad j \in [1, Y], \quad (8)$$

ahol csak azokat az i,j rácspontokat vesszük figyelembe, amelyekre teljesül a következő összefüggés:

$$\frac{W_{i,j}}{N} > 0.01, \quad (9)$$

illetve F jelöli a fenti kritériumnak megfelelő rácspontok számát. A hatásterület középpontjának magasságát hasonló módon számoljuk, azonban $\overline{P_{i,j}}$ helyett az egyes rácspontok átlagos magasságával számolunk, amit az áthaladó trajektóriák adott rácspontra eső magasságaiból kapunk meg.

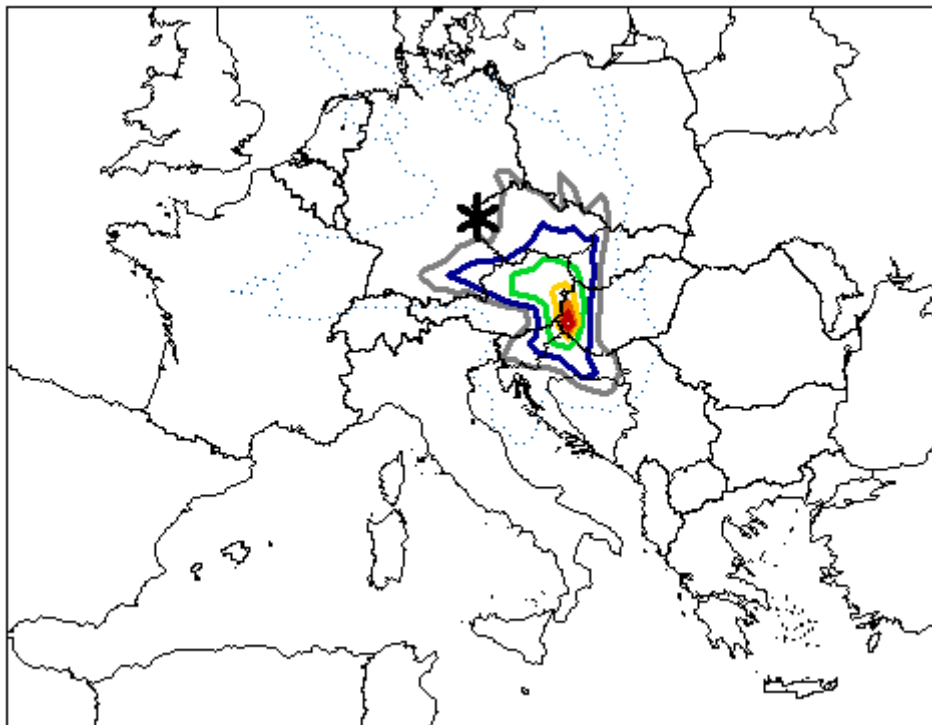
A hatásterület középpontjának és a torony koordinátáinak felhasználásával kiszámíthatjuk a középpont toronytól való távolságát, illetve a lefedett rácspontok számából megbecsülhetjük a koncentráció hatásterület nagyságát.

A 4.2. ábrán a 2003 nyarára számított, 72 órás backward trajektóriák alapján $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ rácsfelbontású koncentráció hatásterületet ábrázoltam. Ennek 1%-os nagysága (vagyis azon területek összessége, ahol a cellában szereplő érték legalább 1%-a a felhasznált trajektóriák

számának) körülbelül 1.125 ezer km², középpontjának távolsága Hegyhátsáltól közel 400 km, magassága pedig több mint 400 m.

Hatásterületek összehasonlításánál, a középpontjaik kiszámításával könnyen meghatározhatjuk két hatásterület egymással bezárt szögét is.

Az előző példa hatásterületének bezárt szöge egy fiktív északi irányultságú hatásterülettel 44 fok.



4.2. ábra: 0,5 fokos rácsfelbontású koncentráció hatásterület 2003 nyarán Hegyhátsádra, 72 órás backward trajektóriák alapján. A csillag a hatásterület középpontját jelöli, amelyet a (8) egyenlet segítségével határoztunk meg.

Százalék	1%	2,5%	5%	10%	25%	50%	75%
Vonal	Pontozott	Szürke	Kék	Zöld	Sárga	Narancs	Piros

4.1. táblázat: A hatásterület súlyozás szerinti megoszlásának jelölése a dolgozatban.

4.2. Esettanulmányok

Először néhány olyan eseményt vizsgáltam meg, amikor a Hegyhátsálon mért szén-dioxid koncentrációban jól látható, a helyi eseményekkel (pl. a növények szénfelvétele, antropogén

kibocsátás) nem magyarázható szakadás lépett fel. Ennek során a szélesebbeséget, a szélirányt, a hőmérsékletet, a relatív nedvességet, valamint a szén-dioxid koncentrációt elemeztem a tornyon 115 méteres magasságában végzett mérések alapján. A szakadást előidéző folyamatok megértéséhez kiszámítottam az események előtti, illetve utáni 6 - 6 órás időintervallumra vonatkozó koncentráció hatásterületet, és annak megváltozását is vizsgáltam.

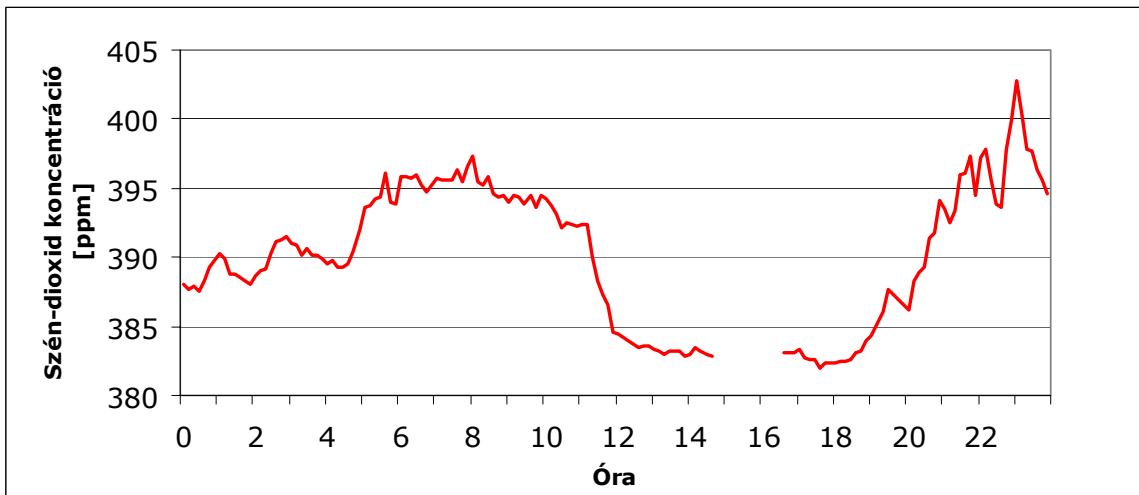
4.2.1. 2003. április 11.

2003. április 11-én a Kárpát medence felett egy viszonylag alacsony nyomású szinoptikus képződmény helyezkedett el, hazánk felett pedig hidegfront vonult át. A mérés helyszínét a front helyi idő szerint 11 óra körül érte el, melynek hatására a szén-dioxid koncentráció közel 10 ppm-et esett (4.3. ábra).

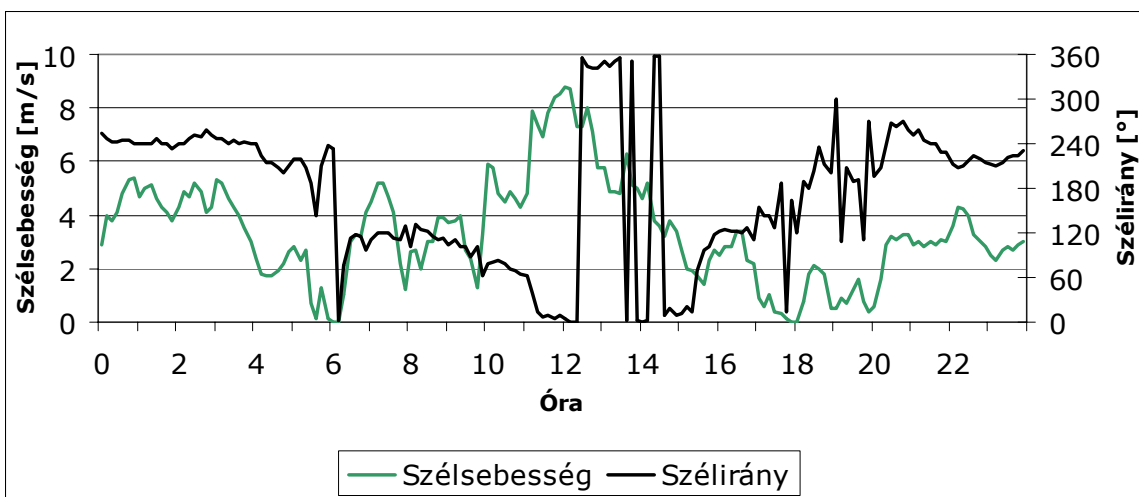
A front átvonulásának hatására a szél északiasra fordult, a szélesebbesség pedig megnőtt (4.4. ábra). A legjelentősebb változás a hőmérséklet alakulásában következett be, mely $+5^{\circ}\text{C}$ körüli értékről rövid idő alatt fagyponthoz közeli szintre süllyedt (4.5. ábra). A relatív nedvességben a folyamat során nem következett be erőteljes változás, de megfigyelhetünk egy kis esést a front átvonulásakor, majd a páratartalom értéke visszaugrik telítettséghez közeli állapotra. Ezt a frontot kísérő kis mennyiségű csapadék (kb. 1 mm) okozta, ami elfedte a páratartalom csökkenését. Csapadék nélküli frontátvonulás esetén valószínűleg a páratartalom csökkenése lépett volna fel.

A frontot megelőző, illetve az azt követő 6 órás hatásterületben, a várakozásnak megfelelően, jelentős változást tapasztaltunk. Az átvonulás előtti hatásterület 1%-os területének agysága 198 ezer km^2 , az átvonulás utánié pedig mindössze 128 ezer km^2 (4.6. ábra).

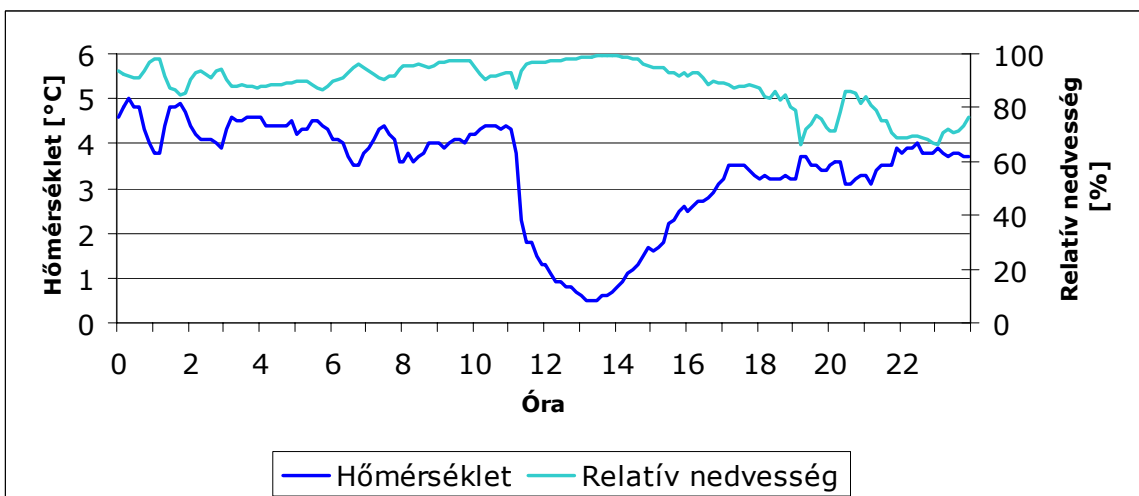
Azonban nem csak a méret, hanem az elhelyezkedés is jelentősen változott. Az esemény során a koncentráció hatásterület középpontja délnyugati irányból 64 fokkal nyugati-északnyugati irányba helyeződött át, több mint 150 km-t távolodott és több mint 400 métert emelkedett. Ez az emelkedés is azt jelzi, hogy a trajektóriák a szabad troposzférából érkeztek, és ez okozhatta a koncentráció esését. A páratartalom kezdeti csökkenése is arra utal, hogy szárazabb, szabad troposzférikus levegő keveredhetett a határretegbe a front áthaladása során.



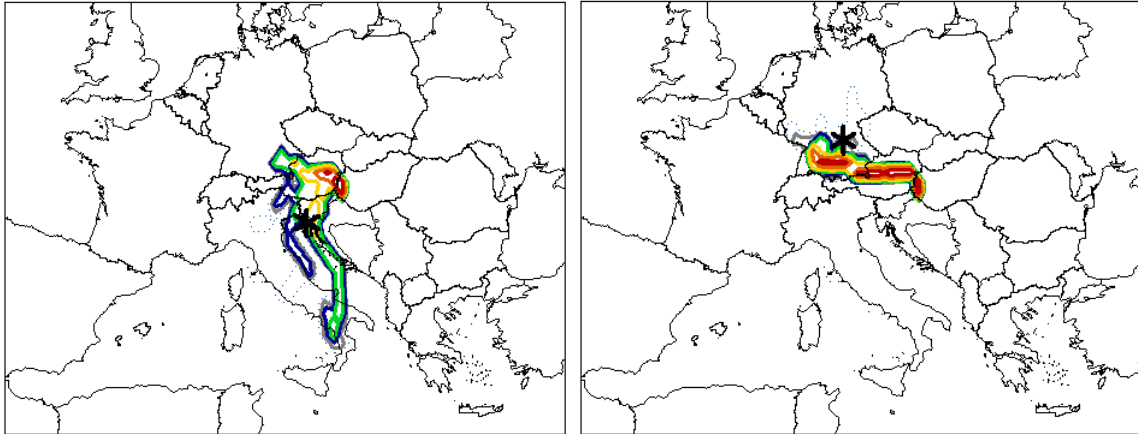
4.3. ábra: A szén-dioxid koncentráció alakulása Hegyhátsálon 2003. április 11-én, 115 méteren



4.4. ábra: A szélsébség és a szélirány alakulása Hegyhátsálon 2003. április 11-én, 115 méteren



4.5. ábra: A hőmérséklet és a relatív nedvesség alakulása Hegyhátsálon 2003. április 11-én, 115 méteren



4.6. ábra: A 2003. április 11-i front átvonulását megelőző (bal oldal) és az azt követő (jobb oldal) koncentráció hatásterület 6 darab óránkénti trajektóriából számolva. A csillag a hatásterület középpontját jelöli. A színek magyarázata megtalálható a 4.2. táblázatban.

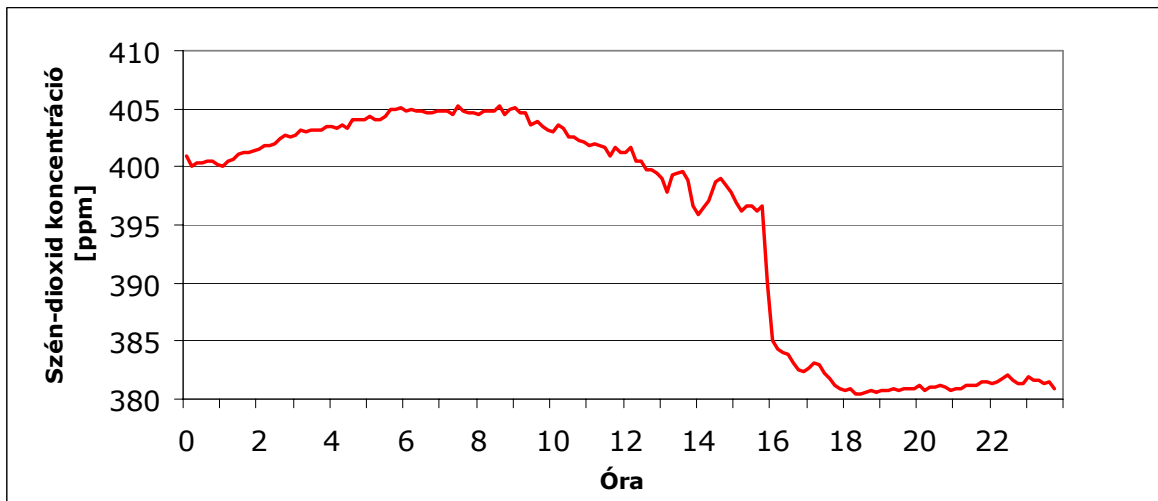
4.2.2. 2003. december 6.

2003. december 6-án hazánk felett hidegfront vonult át. A mérés helyszínét a front helyi idő szerint 16 óra körül érte el, melynek hatására a szén-dioxid koncentráció körülbelül 15 ppm-et esett (4.7. ábra).

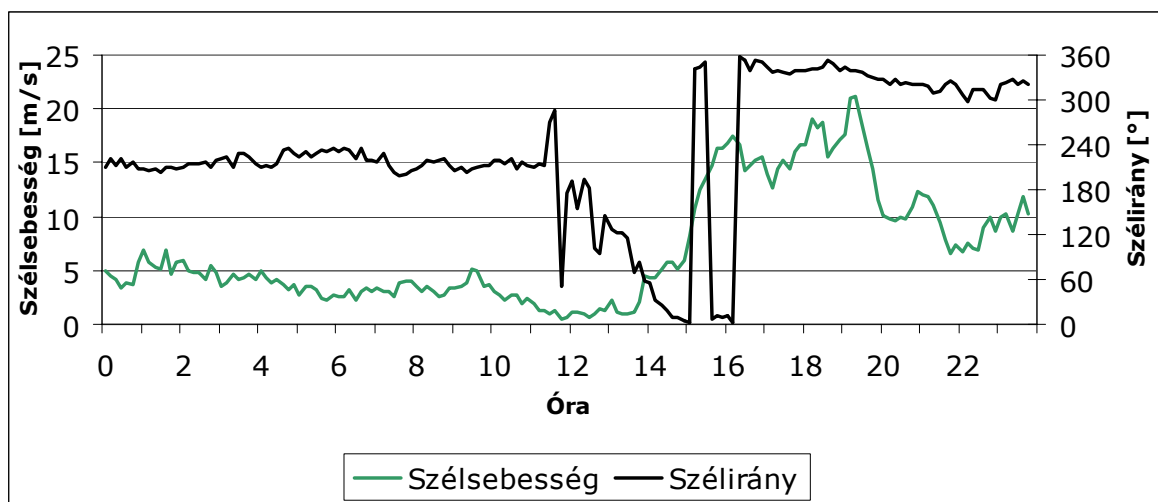
A front átvonulása után a szél északiasra fordult, a szélesség pedig jelentősen megnőtt (4.8. ábra). A hőmérséklet a front megérkezését követően rövid idő alatt körülbelül 5°C-ot csökkent (4.9. ábra). A relatív nedvesség a front előtti időszakban 100% körül mozgott, majd az átvonuláskor kisebb ingadozásokkal ugyan, de 60% körüli értéke süllyedt.

A frontot megelőző, illetve az azt követő 6 órás hatásterületek között, ahogy vártuk, ebben az esetben is jelentős eltérést tapasztaltunk. Az átvonulás előtti hatásterület 1%-os vetületének nagysága közel 170 ezer km², az átvonulás utánié pedig körülbelül 350 ezer km² (4.10. ábra).

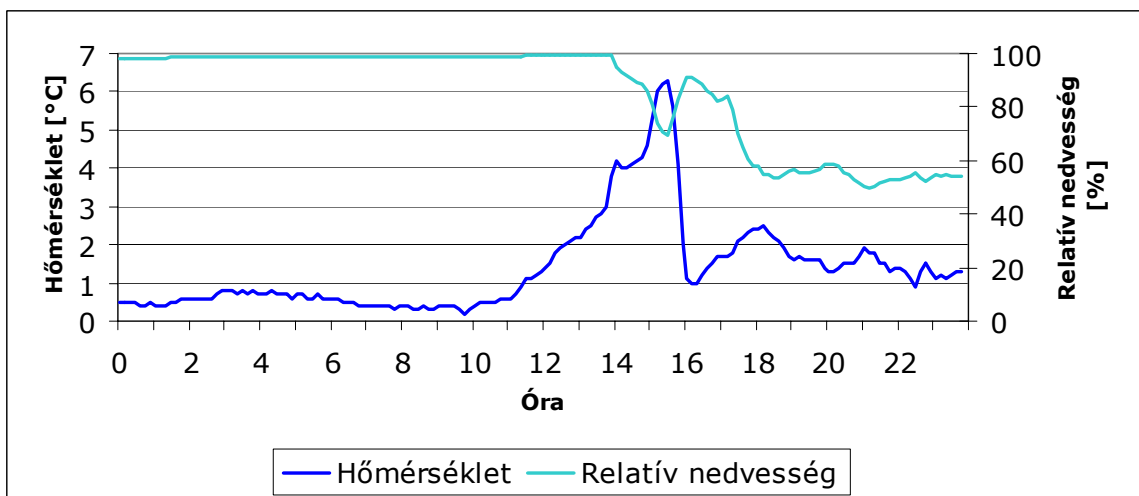
Az előző esettanulmányhoz hasonlóan itt sem csak a méret, hanem az elhelyezkedés is jelentősen változott. Az eseményt követően a koncentráció hatásterület középpontja körülbelül 40 fokkal nyugati irányból észak-nyugati irányba helyeződött át, több mint 550 km-t távolodott, és körülbelül 350 métert süllyedt.



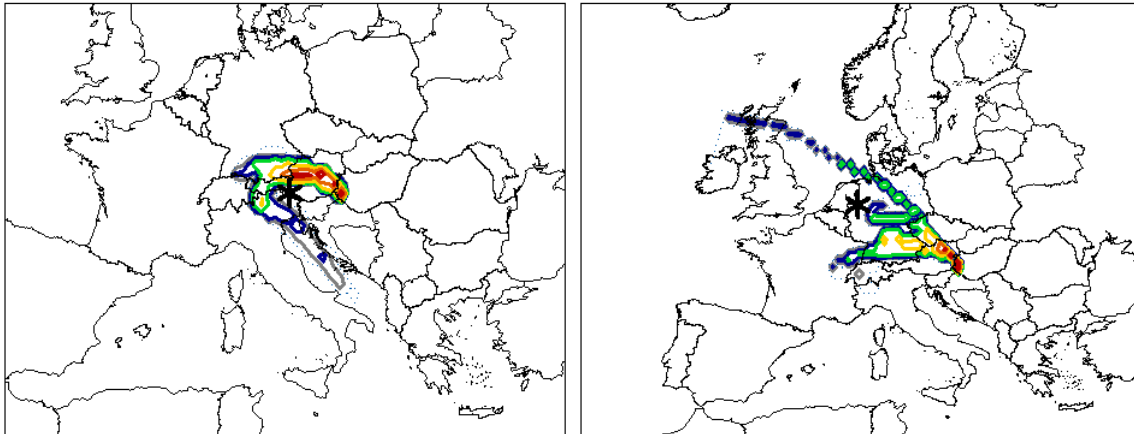
4.7. ábra: A szén-dioxid koncentráció alakulása Hegyhátsálon 2003. december 6-án, 115 méteren



4.8. ábra: A szélsébség és a szélirány alakulása Hegyhátsálon 2003. december 6-án, 115 méteren



4.9. ábra: A hőmérséklet és a relatív nedvesség alakulása Hegyhátsálon 2003. december 6-án, 115 méteren



4.10 ábra: A 2003. december 6-i front átvonulását megelőző (bal oldal) és az azt követő (jobb oldal) koncentráció hatásterület 6 darab óránkénti trajektóriából számolva. A csillag a hatásterület középpontját jelöli. A színek magyarázata megtalálható a 4.2. táblázatban.

4.2.3. 2003. december 14.

2003. december 14-én hazánk felett egy, a Kárpát-medencétől északra fekvő ciklon hidegfrontja vonult át. A hegyhátsági mérőtornyot a front helyi idő szerint 15 óra körül érte el, melynek hatására a szén-dioxid koncentráció több mint 20 ppm-mel esett (4.11. ábra).

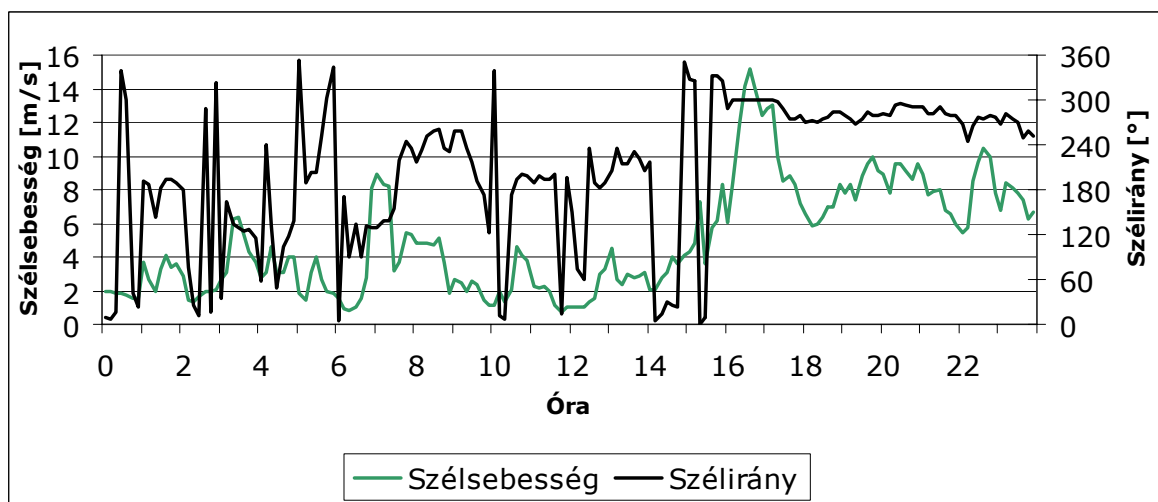
A front átvonulásának hatására a szél északnyugatiasra fordult, a szélesség pedig ugrásszerűen megnőtt (4.12. ábra). A hőmérséklet a szakadási felület áthaladásának köszönhetően 6°C-t emelkedett (4.13. ábra), ami arra utal, hogy a vizsgált jelenség a Kárpát-medencében a téli félévben viszonylag sűrűn előforduló álcázott hidegfront. A relatív nedvesség a front előtti időszakban 80% körül mozgott, majd az átvonuláskor 40% körüli értéke süllyedt.

A frontot megelőző, illetve az azt követő 6 órás hatásterületben, ahogy vártuk, ebben az esetben is jelentős eltérést tapasztaltunk. Az átvonulás előtti hatásterület 1%-os vetületének nagysága több mint 285 ezer km², az átvonulás utánié pedig közel 350 ezer km² (4.14. ábra).

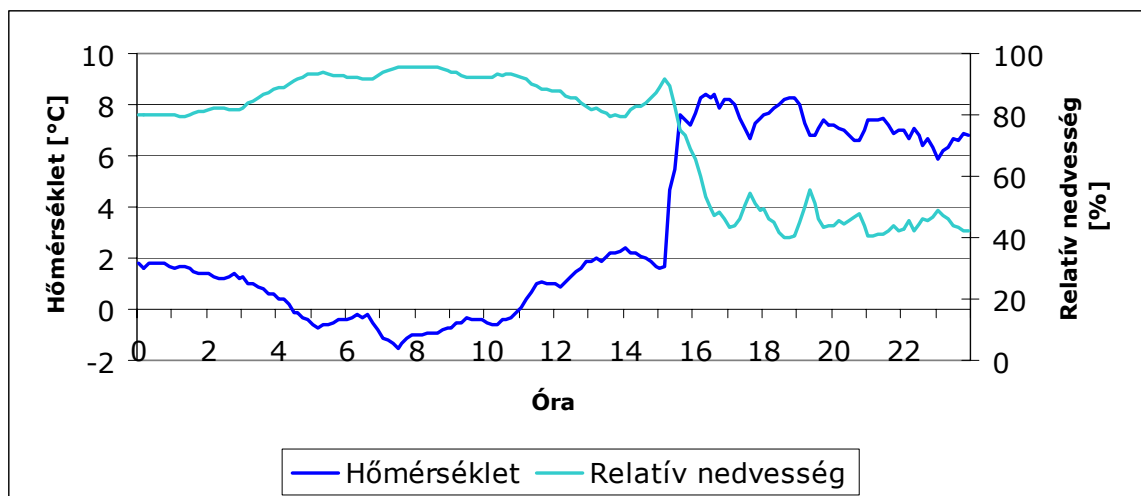
Ebben az esetben az eseményt követően a koncentráció hatásterület középpontja nem fordult el szignifikánsan. Azonban a mérőtornyhoz képest, több mint 250 km-t távolodott, illetve körülbelül 1400 métert emelkedett.



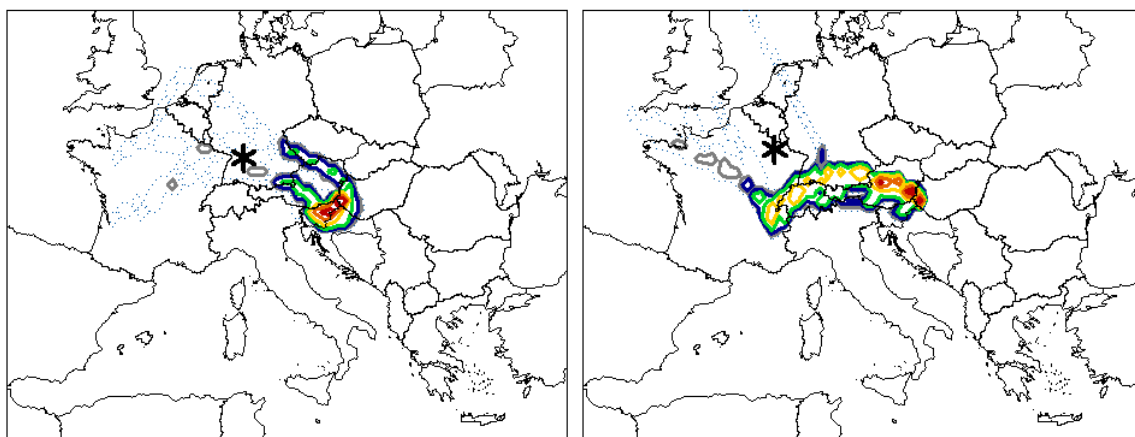
4.11. ábra: A szén-dioxid koncentráció alakulása Hegyhátsálon 2003. december 14-én, 115 méteren



4.12. ábra: A szélsebesség és a szélirány alakulása Hegyhátsálon 2003. december 14-én, 115 méteren



4.13. ábra: A hőmérséklet és a relatív nedvesség alakulása Hegyhátsálon 2003. december 14-én, 115 méteren



4.14. ábra: A 2003. december 14-i front átvonulását megelőző (bal oldal) és az azt követő (jobb oldal) koncentráció hatásterület 6 darab óránkénti trajektóriából számolva. A csillag a hatásterület középpontját jelöli. A színek magyarázata megtalálható a 4.2. táblázatban.

4.3. Következtetések

A fent bemutatott esettanulmányok közös jellemzője, hogy a megváltozott áramlási rendszer hatására más CO₂ kicserélődési „múlttal” rendelkező levegő került a korábban ott tartózkodó levegő helyére.

A 4.1. ábráról leolvasható, hogy április 11-én (2003 101. napja) a határreteg jellemző CO₂ koncentráció még éppen meghaladta az MBL koncentrációt, vagyis a szabad troposzférikus levegő valóban okozhatott egy kisebb koncentrációesést.

A 4.1. ábra alapján mindkét téli esettanulmánynál tapasztalt (2003 340. és 348. napja) extrém nagy (15-20 ppm!) koncentráció-ugrását is értelmezni tudjuk: télen a határreteg átlagos koncentrációja lényegesen nagyobb, mint az MBL háttér-koncentráció. Ezt valószínűleg a nagyobb fosszilis CO₂ kibocsátás (fűtési időszak) okozza, ami a sekély téli határretegben felgyülemlik a felszín közelében a határreteget lezáró inverzió izoláló hatása miatt. Tudjuk, hogy a Kárpát-medence térségében télen gyakoribbak a ciklonok, mint nyáron, ezért igen nagy koncentráció-eséseket látunk a 4.1. ábra téli időszakában, amit a jóval alacsonyabb koncentrációjú szabad troposzférikus levegő időközönkénti bekeveredése okozhat. Ezt a megállapítást megerősíti a hatásterület magasságának növekedése is.

Az elemzések a hatásterület megváltozásának felismerésével sok mindent megmagyaráznak, de nem mindig kapunk választ arra a kérdésre, hogy a 4.2.1 fejezetben felvázolt egyszerű modellen túllépve milyen események hatására történhet még koncentráció-változás, pl. frontmentes időszakban. Ezen felül nem is várhatjuk el a fent vázolt, igencsak

leegyszerűsített modelltől, hogy minden koncentráció-változást megmagyarázzon, hiszen tapasztalataink szerint a mért szén-dioxid koncentráció idősorok nagy változékonysággal bírnak (lásd 4.1. ábra), amelyeket egyértelműen nem lehet kizárólag időjárási frontokhoz kötni.

Egy kézenfekvő magyarázat a mért változékonyság további magyarázatára az emberi hatás figyelembevétele, hiszen jól tudjuk, hogy a sűrűn lakott Európában nem ritkák az ipari zónák, ahol jelentős fosszilis eredetű CO₂ kibocsátás történik, valamint az ipar és a közlekedés is jelentős kibocsátó. Ha frontot kísérően, vagy fronttól függetlenül változás lép fel a szélirányban (vagyis az áramlási rendszerben), és ezzel párhuzamban az új levegőelem nagyobb mennyiségben tartalmaz ipari vagy más emberi eredetű szén-dioxidot (vagy fordítva), akkor a változást nyilvánvalóan hibás lenne a fennálló függőleges gradiensnek vagy a függőleges átkeveredésnek tulajdonítani.

Ahhoz, hogy lehetőséget teremtsünk a bekeveredő, erős fosszilis jel felismerésére, túl kell lépnünk a pusztán aerodinamikai alapú elemzéseken, és olyan módszert kell használnunk, ahol a mért CO₂ koncentráció adatokat közvetlenül is fel tudjuk használni a számításokban. Ennek egy lehetséges és kézenfekvő módja a CO₂ térkép (chart) megkonstruálása, amit a trajektóriák és a mért adatok kombinációjával számolunk (Szabó, 2006).

5. Szén-dioxid térkép

A szén-dioxid térkép (Stohl et al., 1996) gyakorlatilag a trajektória-számítás és a mért szén-dioxid koncentráció értékek összekapcsolását jelenti. A gyakorlatban ez úgy képzelhető el a legjobban, hogy minden egyes trajektóriához hozzárendelünk egy számértéket, ami a térkép készítésének céljából fakadón lehet koncentráció érték, vagy akár hőmérséklet vagy más meteorológia paraméter értéke is. Az adott trajektóriát az adott érték reprezentálja teljes hosszában.

A trajektóriák pontjait (általában óránként vagy 3 óránként állnak rendelkezésre trajektória-adatok) egy tetszőleges felbontású rácsra fektetjük, és egy átlagolt mezőt hozunk létre az egyes trajektóriák által felvett értékekből, több trajektória felhasználásával. A kapott mezőn elvégezhetők további szükséges simítások, finomítások, majd igény szerint további iterációs lépésekkel pontosíthatjuk a kapott eredményt.

5.1. Matematikai leírás

Tekintsünk N darab L óra hosszúságú backward-trajektóriát, illetve a mérőhelyre való érkezésükkor mért szén-dioxid koncentráció értékét. A CO₂-térkép készítésénél egy előzetesen definiált rács minden egyes rácspontjában kiszámítjuk az adott rácspontra vonatkozó átlag-koncentráció értékét ($\overline{C}_{a,b}$) a következő formulával (Stohl et al., 1996):

$$\overline{C}_{a,b} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \tau_{a,b,i}} \sum_{i=1}^N \tau_{a,b,i} \cdot c_i \quad (12)$$

ahol N a feldolgozandó trajektóriák számát, c_i a trajektória érkezésének helyén mért szén-dioxid koncentrációt, $\tau_{a,b,i}$ pedig az i . trajektória a,b rácspontban eltöltött idejét jelöli.

A mező iteratív finomításához további számítások szükségesek. Jelölje X_{ti} azt a koncentráció értéket, melyet \overline{C} felvesz abban a rácspontban, melyet az i . trajektória t . időpillanatában érint, \overline{X}_i pedig jelölje az i . trajektória mentén az X_{ti} értékek átlagát. Az új koncentrációk így az i . trajektória mentén a következő formula szerint alakulnak:

$$c_{ti} = c_i \frac{X_{ti}}{\overline{X}_i} \quad (13)$$

Így a simított mező a,b rácspontjának koncentrációját a fentiek felhasználásával a következőképpen számíthatjuk ki:

$$\overline{C}_{a,b} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^L \tau_{a,b,i,t,i}} \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^L \tau_{a,b,t,i} \cdot c_{ti} \quad (14)$$

ahol $\tau_{a,b,t,i}$ az i . trajektória l . szakaszának az a,b rácspontban eltöltött ideje.

A mező simítását iteratív módon végezve egyre simább mezőt kapunk. Ezt addig célszerű folytatni, amíg a régi és új mező közti átlagos különbség nagyobb, mint 0,5% (Stohl et al., 1996).

A szakirodalmi ajánlások szerint az iterációs lépések között az eredmény pontosítása végett mindig elvégzünk egy ún. 9-pontos simítást is (Seibert et al., 1994; Stohl et al., 1996).

A 9-pontos simítás során, a teljes mező összes belső pontjának értékét módosítjuk a környező pontok értékeit is figyelembe véve (súlyozás alapján).

A $P_{x,y}$ belső pont értéke, a következő képlet szerint változik:

$$P_{x,y} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{i,j} \cdot P_{x-2+i, y-2+j}, \quad (15)$$

ahol A jelöli a 9 elemű súly-mátrixot, melyre teljesülnie kell annak a feltételnek, hogy elemeinek összege 1. Ez a súly-mátrix a mi esetünkben a Stohl és munkatársai által végzett tanulmány alapján a következőképpen áll elő (Stohl et al., 1996):

$$A = \begin{Bmatrix} 0,05 & 0,08 & 0,05 \\ 0,08 & 0,48 & 0,08 \\ 0,05 & 0,08 & 0,05 \end{Bmatrix}. \quad (16)$$

A szakirodalomban gyakran használatos még a következő alakú súlymátrix is, ennek használata nagyobb mértékben változtatja meg a mezőt, mint az általunk használt mátrix (Ferrarese et al., 2002; Apadula et al., 2003):

$$A = \begin{Bmatrix} 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 1,0 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

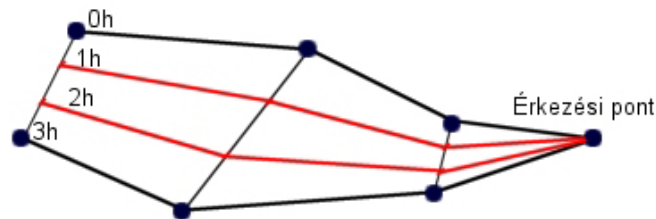
Használata esetén azonban a simítás után a mezőt osztanunk kell a mátrix elmeinek összegével, azaz ebben az esetben 3-mal, mivel a definíció szerint az elemek összegének 1-et kell kiadniuk.

A mi esetünkben a súlymátrix elemeinek összege 1 volt, így az osztást elhagyhattuk.

A későbbiekben a számítások pontosságának javítása miatt elvégzett különböző jellegű szűrések után a trajektóriáknak csak egy részét használjuk fel a számítások során. Ez azonban hamar adathiányhoz vezethet, mivel a FLEXTRA által számított trajektóriák csak 3 óránként állnak rendelkezésre. Ennek kiküszöbölése végett a CO₂-térkép számítások előtt lineáris interpolációval előállítjuk a köztes óránkénti trajektóriákat is. Azaz, ha adott a 0 órás és a 3 órás trajektória, akkor azokból előállítjuk az 1 órás és a 2 órás trajektóriákat a következő

módon (5.1. ábra). Tekintsünk 2 darab L órás backward trajektóriát. Jelölje rendre T_{0h} a 0 órás, T_{3h} a 3 órás trajektóriát. Ekkor a következő módon számítható ki T_{1h} és T_{2h} :

$$T_{1h,j} = \frac{2T_{0h,j} + T_{3h,j}}{3}, T_{2h,j} = \frac{T_{0h,j} + 2T_{3h,j}}{3}, j = 0 \dots L \quad (18)$$



5.1. ábra: Az interpoláció grafikus értelmezése

Fontos paraméter a szén-dioxid térkép felbontása. A felbontás a rácspontok egymástól való távolságát jelenti. Értékét a trajektória-modell és az adatsűrűség figyelembevételével érdemes beállítani. 1 fokos trajektória-modell és óránkénti adatsűrűség esetén célszerű 1-0,5 fokot megadni, mivel a kisebb felbontás már nem hordoz magában további információt, illetve nagy valószínűséggel téves értékeket fog adni.

A szén-dioxid térkép számítása során egy cella eseményszámának azt a számot nevezzük, ami megmutatja, hogy a cella értékét hány trajektóriából állítottuk elő.

Ez alapján egy kritériumot is felállítottunk, amely szerint azokat a cellákat nem vesszük figyelembe a számítások során, melyek eseményszámai a kritikus érték alatt vannak. Ezzel a kritériummal jól lehet szűrni a hamisan jelzett kiugró értékeket, illetve a trajektória modell pontatlanságából fakadó hibákat.

A szén-dioxid térkép készítése során lehetőségünk van arra, hogy a trajektóriáknak csak az első szakaszait használjuk, ahol még nagyobb a trajektória pontossága, mint hosszabb trajektória esetén. Általában a trajektóriák pontossága 72 óráig elfogadható (Kahl et al., 1989; Draxler, 1996) azonban a chart számítások során véleményünk szerint még pontosabb adatokra van szükség, így emiatt a futtatások során csak az első 36 óráját használjuk a trajektóriáknak. Így azonban a trajektóriák rövidsége miatt, csak kisebb területre kapunk információt. Szén-dioxid térképet készíthetünk egyszerre több állomás adatából is, ellensúlyozva a trajektóriák rövidségét, így kielégítő lefedettséget kaphatunk a vizsgált terület felett (Ferrarese et al., 2002; Apadula et al., 2003).

5.2. Szén-dioxid térkép készítésének szemléltetése

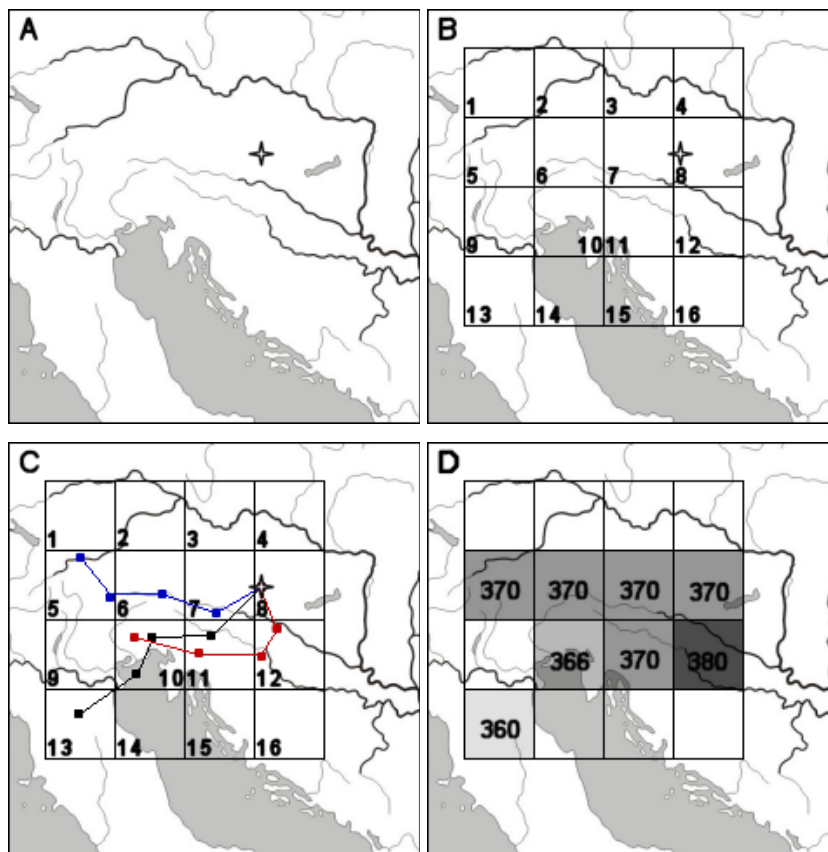
E fejezetben a szén-dioxid térkép készítését mutatjuk be egy egyszerű példa segítségével. A 5.2.A ábrán egy szén-dioxid koncentráció mérőhelyet, illetve annak környékét ábrázoltuk. Csillaggal jelöltük a szén-dioxid koncentráció mérések helyszínét. Az ábra B részében a mérőhely környékét lefedve definiáltunk egy 4×4 -es, általunk választott felbontású rácshálót (\overline{C}_n). E rácsháló felbontása megegyezik a készítendő szén-dioxid térkép rácának felbontásával.

Az 5.2.C ábrán ábrázoltunk 3 darab 4 órás backward-trajektóriát, fekete, kék, illetve piros színekkel, melyeknek óránkénti pontjait négyzetekkel jelöltük. A trajektóriák beérkezésekor mért koncentráció értékek az állomás helyszínén rendre 360, 370, illetve 380 ppm. Így minden adat rendelkezésünkre áll, hogy elkészítsük az állomás környékére vonatkozó szén-dioxid térképet.

A szén-dioxid térkép készítésének első lépcsőjében kiszámítjuk az egyes rácspontok átlagkoncentrációit, a trajektóriák pontjainak és a beérkezésükkor mért koncentrációk ismeretében. A 8. rácspont értéke így a három koncentráció átlaga lesz (370 ppm), mivel ott mindhárom trajektóriának egy-egy pontja található. Azokban a rácspontokban, ahol nincs egyetlen trajektória pont sem (1; 2; 3; 4; 9; 14; 15; 16), a szén-dioxid térkép nem vesz fel értéket, azaz nincs definiálva.

Az így számított átlagkoncentrációkkal kapott mezőt az 5.2.D ábrán ábrázoltuk. Ha egy terület felől nagyobb szén-dioxid koncentrációjú levegő érkezett, akkor azt sötétebb színnel, ha alacsonyabb koncentrációjú, akkor világosabb színnel jelöltük.

Az eredmény pontosabbá tételéhez nélkülözhetetlen iteratív számításokhoz elengedhetetlen kiszámítanunk a trajektória-menti átlagos koncentrációt, amelyet az előbbiekben kiszámított mező illetve a trajektóriák segítségével tehetünk meg.



5.2. ábra. A szén-dioxid térkép készítésének szemléltetése

Megvizsgáljuk, hogy az egyes trajektóriák egyes pontjai mekkora koncentráció-értékkel rendelkező rácspontra esnek, majd ezeket átlagoljuk. Például a piros vonallal jelzett trajektóriának van egy pontja a 8-as, kettő a 12-es, egy a 11-es és egy a 10-es cellában. Így a piros vonal trajektória-menti átlaga a következő formula szerint alakul:

$$\bar{X}_{piros} = \frac{\bar{C}_8 + 2\bar{C}_{12} + \bar{C}_{11} + \bar{C}_{10}}{5} \approx 373 \text{ ppm} . \quad (10)$$

A fekete, illetve kék trajektóriák átlaga hasonló számítások után kerekítve rendre 366 ppm és 370 ppm.

A következő lépésben ismét előállítjuk a teljes mezőt, hasonlóan az első közelítéshez, azonban most a trajektóriákhoz tartozó koncentrációkat beszorozzuk az aktuális rácspon koncentrációjának, illetve a trajektória-menti átlag hányadosával. Például a 10. rácspon értéke a következő képlet szerint alakul:

$$\bar{C}_{10} = \frac{C_{fekete} \frac{366}{366} + 2C_{piros} \frac{366}{373}}{3} \approx 369 \text{ ppm} \quad (11)$$

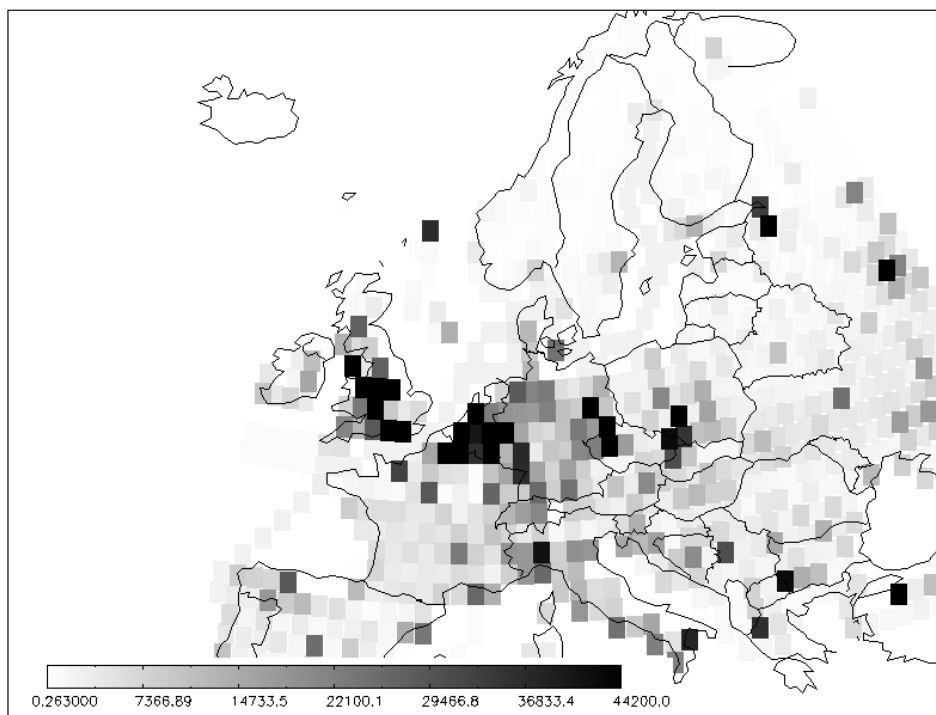
Ennek megfelelően kiszámoljuk az összes rácspontra az értékeket, majd az első közelítésből fakadó mezővel összehasonlítva eldöntjük a következő fejezet végén említett kritérium alapján, hogy elvégzünk-e további iterációs lépéseket vagy már megfelelően pontos eredményt kaptunk.

A szemléltetés során az egyszerűség végett nem vettük figyelembe a későbbiekben alkalmazott szűréseket, illetve a korábbi fejezetekben szereplő 9-pontos simítást.

5.3. EDGAR

Ahhoz, hogy a szén-dioxid térkép valóságosságáról meggyőződjünk, össze kell hasonlítanunk egy valós adatokra épülő, egész Európát lefedő emissziós adatbázis adataival.

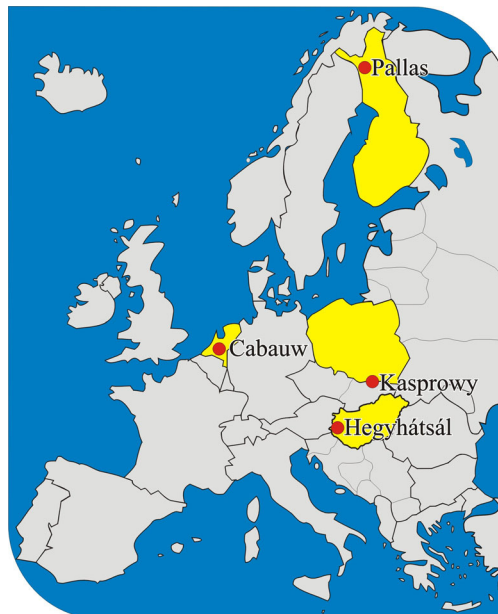
Az EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research) adatbázis az IGAC-GEIA (International Global Atmospheric Chemistry Programme - Global Emissions Inventory Activity) részét képezi, amely a szén-dioxid mellett CO, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x, NMVOC, CFC, stb. gázok emissziójának feltérképezésével és adatbázisba vételével foglalkozik. Az EDGAR adatbázis előállításának során a Föld országait 13 régióba sorolták be. Egyes régiók csak egy-egy országot jelentenek, mint például az Egyesült Államok, Kanada, Japán, míg mások fél- vagy egész kontinensnyi területeket (Nyugat-Európa, Kelet-Európa, illetve Latin-Amerika, Afrika, stb.).



5.3. ábra: Az egyes területek által kibocsátott szén-dioxid mennyisége [t CO₂/év], az EDGAR emisszió adatbázis alapján.

Az 5.3. ábrán az egyes európai területek becsült szén-dioxid emisszióját ábrázoltuk az EDGAR 2000 emisszió adatbázis (Oliver et al., 2001) alapján. Ezzel az adatbázissal összevetve a szén-dioxid térképet egyfajta kvalitatív becslést adhatunk annak helyességére.

5.4. CO₂ mérőállomások



5.4. ábra: A szén-dioxid térképek készítésekor felhasznált állomások elhelyezkedése Európában

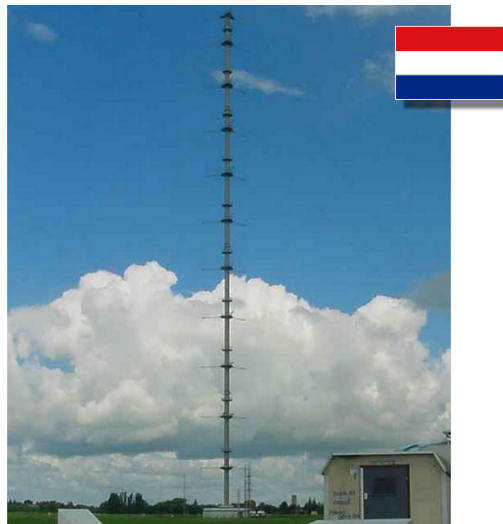
A szén-dioxid térképek készítésekor négy európai mérőhely szén-dioxid koncentráció adatait használhattuk fel (5.4. ábra, 5.1. táblázat): rendelkezünk adatokkal Finnország északi részéből (Pallas), Hollandia partjairól (Cabauw), a Magas-Tátrából Dél-Lengyelország (Kasprowy Wierch) területéről, illetve Nyugat-Magyarországról (Hegyhátsál).

A mérőhelyeket két csoportba tudjuk sorolni a mérés jellege alapján. Cabauw közelében, illetve Hegyhátsálon magas mérőtorony alapú méréseket folytatnak, míg Pallas és Kasprowy környezetében felszíni méréseket végeznek.

Állomás	Ország	Koordináták	Magasság (m asl)	Magasság (m agl)
Cabauw	Hollandia	51°58'N 04°55'E	-0,7 m	+200 m
Hegyhátsál	Magyarország	46° 57'N 16° 39'E	249 m	+115 m
Kasprowy	Lengyelország	49°14'N 19°56'E	1986 m	+2 m
Pallas	Finnország	67°58'N 24°07'E	560 m	+5 m

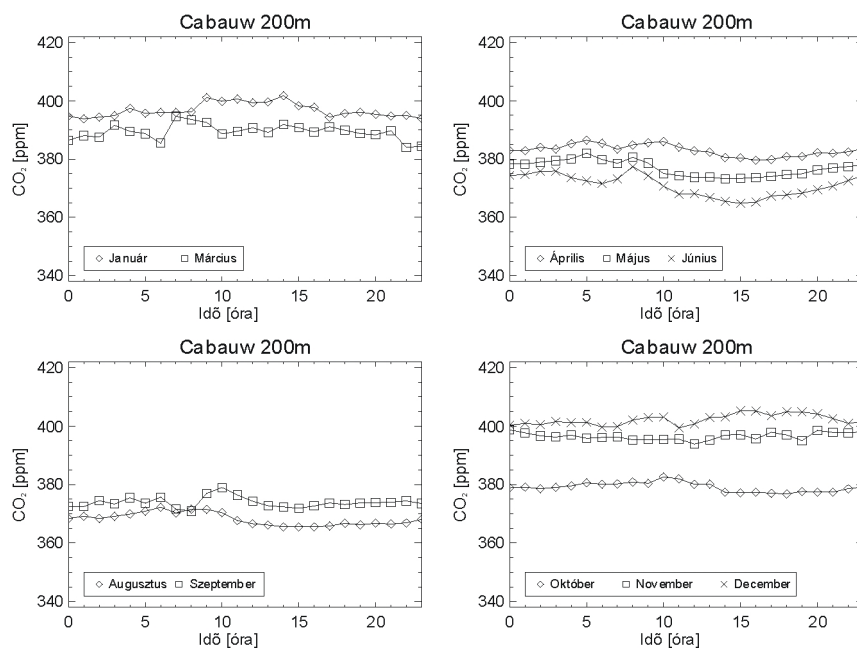
5.1. táblázat: A szén-dioxid térképek készítésekor felhasznált állomások (földrajzi) koordinátái, illetve az állomások tengerszint feletti magassága, valamint a felhasznált mérési szintek talajszint feletti magassága.

5.4.1. Cabauw



5.5. ábra: A Cabauw-i mérőtorony

A Hollandia nyugati részén fekvő Cabauw állomáson 1972 óta végez rendszeres meteorológiai méréseket a Holland Királyi Meteorológiai Intézet (KNMI). A mérés helyszínét (5.5. ábra) úgy választották ki, hogy megfelelően reprezentálja egész Hollandia földhasználatát. A 2 méter átmérőjű mérőtoronyt eredetileg a planetáris határréteg vizsgálatára építették, csak később egészült ki szennyezőanyag-, illetve szén-dioxid méréssel. A 213 méteres tornyon napjainkban több különböző szinten (20, 60, 120 és 200 méteren) folyik a légköri szén-dioxid, a metán, a szén-monoxid, a dinitrogén-oxid és a kén-hexafluorid mérése.



5.6. ábra: A szén-dioxid koncentráció havi átlagos napi menete 2003-ban, a Cabauw-i mérőtorony legfelső szintjén, 200 méter magasan.

Az 5.6. ábrán a szén-dioxid koncentráció havi átlagos napi menete látható a Cabauw-i mérőtorony legfelső szintjén végzett mérések adatai alapján. Az ábra nem teljes, mivel adathiány miatt a havi átlagos napi meneteket nem tudtuk meghatározni február, illetve július hónapokban. A diagramokon jól látható a szén-dioxid koncentrációjában hónapról-hónapra bekövetkező változás, azaz a CO₂ koncentráció éves menete. A legnagyobb koncentráció értékeket decemberben mérték, amikor a legkisebb volt a vegetáció aktivitása illetve a legnagyobb volt az antropogén emisszió, a legalacsonyabb értékeket pedig augusztusban regisztrálták a műszerek, a vegetáció egyik legaktívabb időszakában.

Az első negyedévben a jelentős adathiány miatt tapasztalható egyenetlenség a görbék menetében. A második negyedévben jól látszik, ahogyan az év előrehaladtával nő a szén-dioxid koncentráció napi ingása.

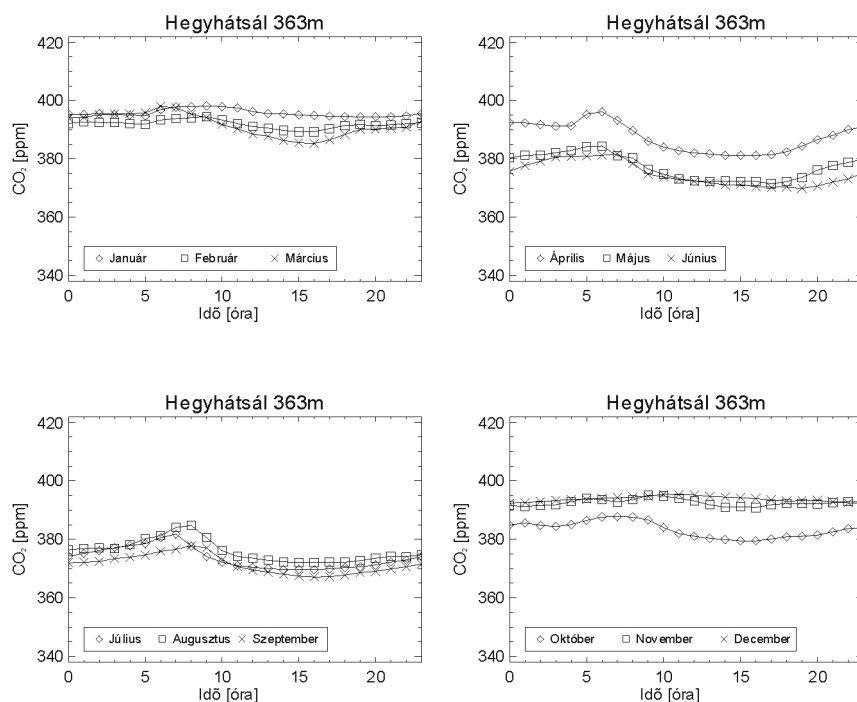
5.4.2. Hegyhátsál



5.7. ábra: A hegyhátsáli TV-adótorony.

A magyarországi mérőállomás (5.7. ábra), tulajdonképpen az első kifejezetten a regionális anyagáram meghatározására létesített európai mérőállomás, amerikai segítséggel és az Antenna Hungária Rt. természetbeni támogatásával a hegyhátsáli TV-adótorony felhasználásával 1994 végén jött létre. Hegyhátsál Magyarország nyugati részén fekszik, Körmend közelében.

A tornyon 10 m és 115 m között négy szinten folyik a levegő szén-dioxid koncentrációjának, illetve az alapvető meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, légnedvesség, szél) mérése.



5.8. ábra: A szén-dioxid koncentráció havi átlagos napi menete 2003-ban a hegyhátsáli mérőtorony legfelső szintjén.

Az 5.8. ábrán a szén-dioxid koncentráció havi átlagos napi menete látható a hegyhátsáli mérőtorony legfelső szintjén végzett mérések adatai alapján. A diagramokon a Cabauw-i mérésekhez hasonlóan jól látható a szén-dioxid koncentrációjában hónapról-hónapra bekövetkező kisebb mértékű változás. A legnagyobb koncentráció értékeket a hegyhátsáli mérések esetében szintén decemberben mérték, amikor a legkisebb volt a vegetáció aktivitása illetve a legnagyobb volt a fűtés miatti antropogén emisszió. Hegyhátsálon a legalacsonyabb értékeket szeptemberben mérték.

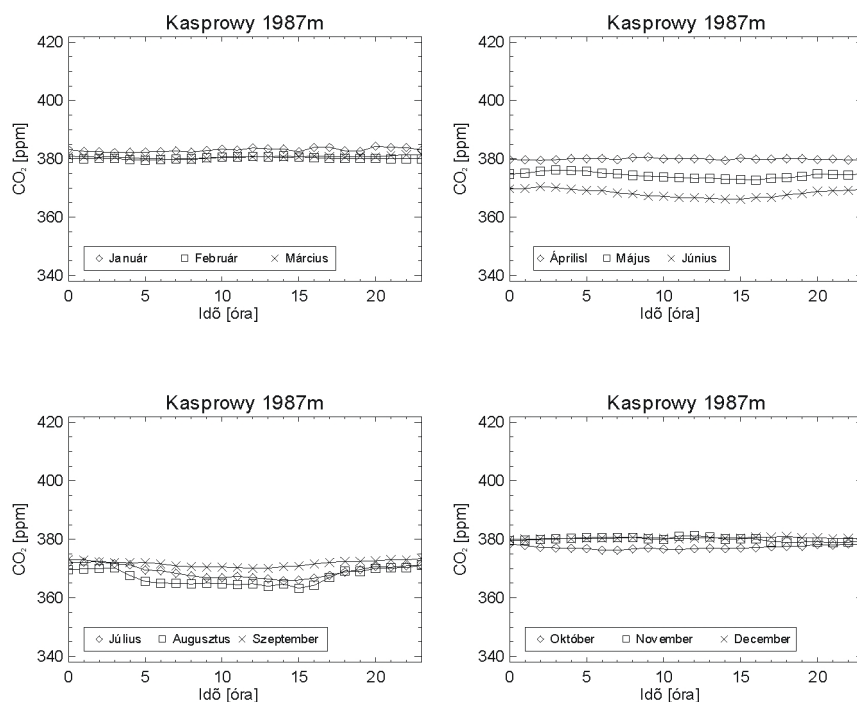
Az első negyedévben jól látható, ahogy az idő előrehaladtával megélnék a légköri átkeveredés, később pedig a vegetáció aktivitása, aminek következtében egyrészt a szén-dioxid koncentrációban enyhe süllyedést fedezhetünk fel, másrészt tisztán kivehető a napi koncentráció ingás növekedése. A vegetáció aktivitásának növekedése a második negyedévben markánsabban folytatódik tovább, majd szeptembertől kezdődően ismételen növekszik a szén-dioxid koncentráció, illetve csökkenést észlelhetünk a napi ingásában is.

5.4.3. Kasprowy Wierch



5.9. ábra: Meteorológiai obszervatórium Kasprowy Wierch-en.

A Kasprowy Wierch állomás Dél-Lengyelországban található, a Magas-Tátra főgerincén. A meteorológiai obszervatórium (5.9. ábra), ahol a mérések folynak, 1989 méter magasan fekszik egy hegycsúcson (a Kasprowy-csúcson [wierch = csúcs]). A vidék tipikus kontinentális hegyvidéki éghajlatú, aránylag magas napi, illetve évi hőingással, nagy mennyiségű évi csapadékkal, erős szelekkel. Itt 1994-ben kezdték el rendszeresen mérni a légköri szén-dioxid koncentrációját, a folyamatos mérésekre azonban két évet kellett várni.



5.10. ábra: A szén-dioxid koncentráció havi átlagos napi menete, 2003-ban a kasprowy wierch-i obszervatórium adatai alapján.

Az 5.10. ábrán a szén-dioxid koncentráció havi átlagos napi menete látható a Kasprowy Wierch-i obszervatórium adatai alapján. A diagramokon a hegyhátsági és a Cabauw-i mérésektől eltérően kisebb mértékben észlelhető a vegetáció hatására a szén-dioxid koncentrációjában hónapról-hónapra bekövetkező változás. A legnagyobb koncentráció értékeket Kasprowy Wierch-en januárban mérték, a legalacsonyabb értékeket a Cabauw-i mérésekhez hasonlóan augusztusban regisztrálták.

A napi, illetve évi koncentráció ingás kisebb mértéke a mérőállomás magasságával magyarázható, ugyanis a Kasprowy Wierch-i obszervatórium mintegy 300 méterrel a fás szárú növényzet élőhelyének határa felett található. Így az állomás magasságában a vegetáció már nem tudja olyan mértékben kifejteni a hatását, mint az alacsonyabb magasságokban. Ennél is fontosabb, hogy a mérőállomás vélhetőleg gyakran a szabad troposzférában helyezkedik el, így a felszíni hatások lényegesen kevésbé érvényesülnek.

5.4.4. Pallas

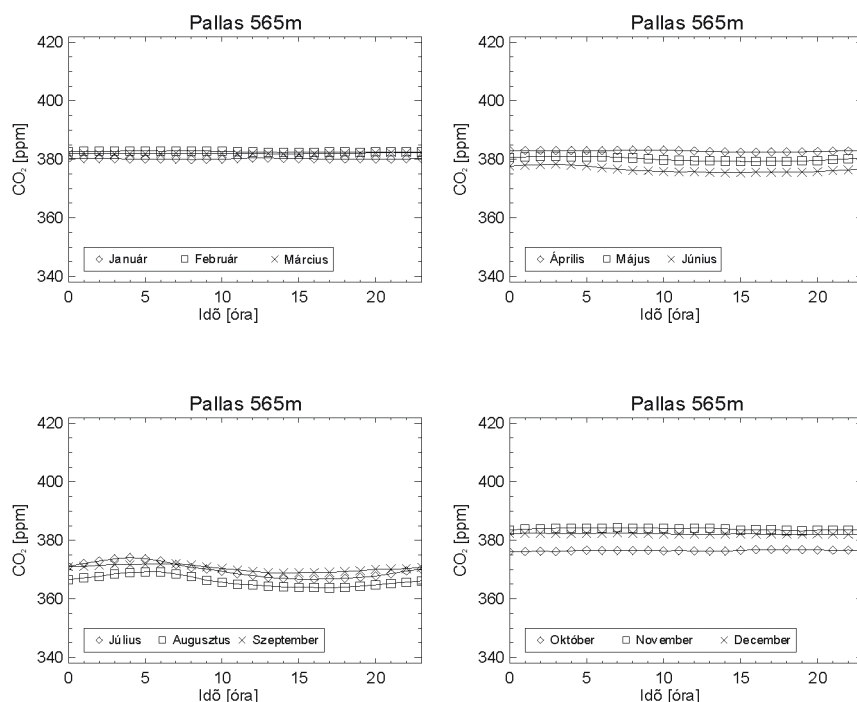


5.11. ábra: A pallas-i mérőállomás.

A finn globális légkörfigyelő állomás 1994 óta működik Pallas-on és Sodankylä-n, Észak-Finnországban. A mérési feladatokat azért osztották ketté, mert levegőkémiai mérésekhez nem alkalmas Sodankylä fekvése, mivel közel fekszik egy nagyobb településhez. Sodankylä-n folynak a magaslégköri, klimatológiai és általános meteorológiai mérések, Pallas-on (5.11. ábra) pedig a légkör összetevőinek vizsgálatát, illetve a határréteggel kapcsolatos méréseket végzik. A két állomás 125 km távolságra helyezkedik el egymástól.

A szén-dioxid mérőállomás a Pallas-Ounastuntur-i nemzeti park területén fekszik, melynek környezetében kimondottan kevés szennyezőanyag forrás található. A népsűrűség 100 km-es körzetben kisebb, mint 2 fő/km^2 , a legközelebbi település a 19 km-re található Muonio, 2500 lakossal. Pallas környéke közel helyezkedik el a boreális térség északi határához. Az évi középhőmérséklet $-1,6^\circ\text{C}$. Télen akár -30°C alatti, nyáron pedig 20°C feletti hőmérsékletek is előfordulhatnak. A felszín októbertől májusig hóval borított. A nap december 9-től január 3-ig egyáltalán nem látható, illetve május 28-tól július 18-ig nem süllyed a horizont alá.

Folyamatos szén-dioxid koncentráció mérést 1996 októbere óta végeznek a Finn Meteorológiai Intézet (FMI), illetve az Air Quality Research of the Atmospheric Environment Service, Environment Canada (AES) közreműködésével.



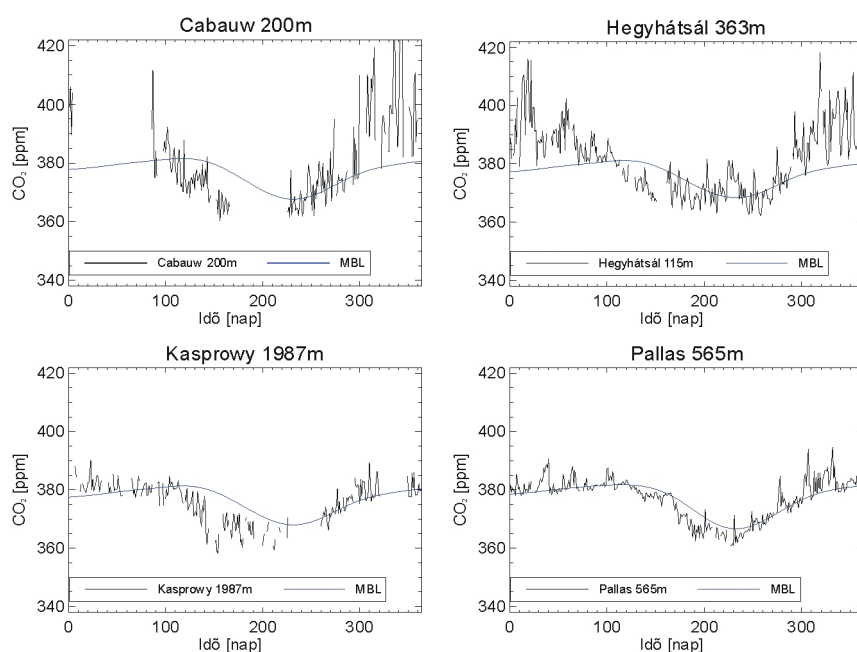
5.12. ábra: A szén-dioxid koncentráció havi átlagos napi menete 2003-ban, a Pallas-i mérőállomás adatai alapján.

Az 5.12. ábrán a szén-dioxid koncentráció havi átlagos napi menete látható a Pallas-i mérőállomás adatai alapján. A diagramokon a Kasprowy Wierch-i mérésekhez hasonlóan kisebb mértékben észlelhető a bioszféra hatására a szén-dioxid koncentrációjában hónapról-hónapra bekövetkező változás. A legnagyobb koncentráció értékeket a Pallas-i mérések esetében a többi állomástól eltérően novemberben mérték, azonban a legalacsonyabb értékeket a Cabauw-i és a Kasprowy Wierch-i mérésekhez hasonlóan augusztusban regisztrálták. Jól láthatóan a harmadik negyedévben a legnagyobb a bioszféra aktivitása, ugyanis ekkor a legnagyobb az átlagos napi koncentráció ingás.

A napi, illetve évi koncentráció ingás kisebb mértéke Pallas esetén nem csak a mérőállomás tengerszint feletti magasságával, hanem az állomás földrajzi szélességével magyarázható, ugyanis a pallas-i mérőállomás Finnország boreális térségében fekszik, ahol sokkal kevésbé aktív a vegetáció, mint az alacsonyabb szélességeken. Emiatt a vegetáció már nem tudja olyan mértékben kifejteni a hatását, mint Cabauw és Hegyhátsál esetében.

5.5. Szűrések

Mivel hosszabb időszak adatait vizsgáljuk statisztikai módszerrel, így előfordulhat, hogy a szén-dioxid koncentráció éves menete befolyásolja a CO₂-térkép értékeit. Tekintettel arra, hogy a növényzet nyugvó állapota és a nagyobb fosszilis kibocsátás miatt télen magasabb a határreteg szén-dioxid koncentrációja (5.13. ábra), mint nyáron, a két időszak között pedig változó, célszerű csak a nyári, illetve csak a téli időszakra készíteni térképet. Ellenkező esetben a magasabb határretegen belüli háttér-koncentrációt, ami pl. ősszel kialakul, a szén-dioxid térkép hibásan emberi eredetű jelnek tekint, ami módosítja az eredményeket. Az éves menetet kiszűrhetjük úgy, hogy csak a téli, illetve a nyári hónapok adatait használjuk fel szén-dioxid térkép készítésekor.



5.13. ábra: A koradélutáni szén-dioxid koncentráció átlagok és az óceáni határreteg (amivel közelíthető az alsó szabad troposzféra koncentrációja) szén-dioxid koncentrációjának (GLOBALVIEW-CO₂, 2003) éves menete Cabauw, Hegyhátsál, Kasprowy Wierch és Pallas mérőállomásokon.

A pontosabb eredmény elérése érdekében csak a kora délutáni időszakot (13-17 h, trajektória interpolációval) használjuk, mert a határreteg ekkor jól átkevert, vagyis az éjszaka felhalmozódott (és kizárólag a mérőhelyre és közvetlen környezetére jellemző) többlet szén-

dioxid ekkorra már teljesen elkeveredik a határrétegben, így a mért jel nagy területet reprezentál.

Az 5.13. ábrán a fekete vonal jelöli az egyes állomásokon mért szén-dioxid koncentráció koradélutáni átlagát, a kék vonal pedig az egyes állomások földrajzi szélességén a tengeri határréteg koncentráció értékét (amivel közelíthetjük a szabad troposzféra alsó részének viszonyait).

Az ábrán jól láthatjuk, hogy mind a négy szén-dioxid koncentráció mérő állomás esetén igaz az, hogy a határréteg tetején elhelyezkedő záróréteg fennállása miatt és a bioszféra éves dinamikájának hatására az év szinte minden egyes napján koncentráció gradiens áll fenn a határréteg és a szabad troposzféra között. Ez a koncentráció gradiens annál kisebb, minél magasabban, illetve a szennyezőanyag forrástól minél távolabb végezzük a méréseket.

5.6. Egyedi chart

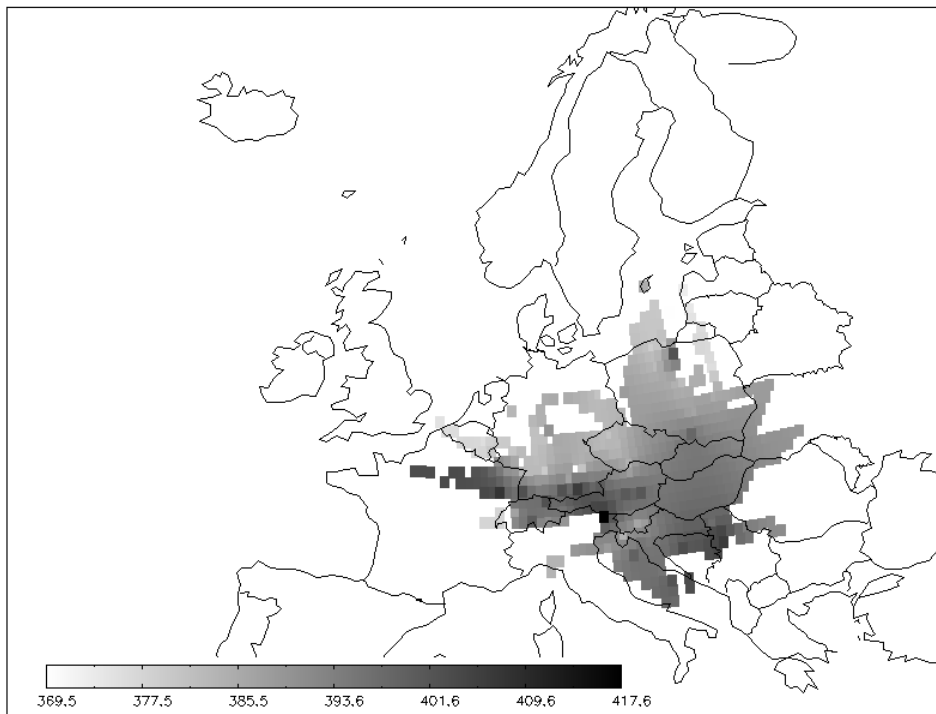
A továbbiakban az általunk készített szén-dioxid térképeket (chart) mutatjuk be. Megmutatjuk az egyes szűrések, finomítások hatásait, majd elemezzük a kapott eredményeket.

A dolgozatban szereplő összes szén-dioxid térképet a szakirodalomban használt 120 órás trajektóriák (Aalto et al., 2002; Ferrarese et al., 2002; Apadula et al., 2003) helyett 36 órás backward trajektóriák felhasználásával készítettem. Ugyan a trajektóriák pontossága 72 óráig elfogadható (Kahl et al., 1989; Draxler, 1996), azonban a pontatlanság az eltelt idővel együtt nő, így a trajektóriák első szakasza tekinthető a legpontosabbnak. Emiatt jelen dolgozatban 36 órában limitáltuk a felhasznált trajektóriák hosszát a lehető legpontosabb eredmény elérése érdekében. A felhasznált trajektóriákat a FLEXTRA 3.3 trajektória modellel számították ki egységes módszerrel a Finn Meteorológiai Szolgálat munkatársai. A chart rácshálóját a szakirodalomban használnál finomabb felbontásúra állítottuk be (ezt a Stohl et al. (1996) által publikált programcsomag nem tette lehetővé, emiatt készítettem egy saját fejlesztésű chart szoftvert), nevezetesen $1^\circ \times 1^\circ$ helyett $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ felbontást alkalmaztunk. A 5.1. fejezetben tárgyalt minimális eseményszámot 3-nak vettük.

Az alább bemutatásra kerülő szén-dioxid térképeken a sötétebb területek jelölik azokat a helyeket, ahonnan a magasabb szén-dioxid koncentrációjú levegő érkezett, vagyis az adott terület felett nagy valószínűséggel nagyobb mennyiségű szén-dioxid került a légkörbe, mint a világosabb területek felett. A szén-dioxid térképeken a skála mindig a bal alsó sarokban

található, a mértékegység pedig kivétel nélkül ppm. A ppm természetesen a légköri szén-dioxid keverési arányának a mértékegysége, nem a CO₂ emisszió mértékegysége, az emisszió és a számított koncentráció értékek közt nincs egyszerű kapcsolat. Ehelyett a magas koncentrációval jellemezhető helyeket kvalitatív értelemben hozzuk összefüggésbe a fosszilis eredetű szén-dioxid kibocsátással, az EDGAR adatbázis alapján. Jelen dolgozatnak nem célja, hogy a mért adatok alapján a kibocsátás mértékét megbecsüljük.

Az 5.14. ábrán a 2003. januári és februári, Hegyhátsálon végzett mérésekből készített szén-dioxid térkép látható. Az ábra készítése során mind az éjszaka, mind a nappal mért adatokat felhasználtuk. Az EDGAR 2000 adatbázissal (5.3. ábra) összevetve a legmagasabb értékű pontokat (angolul „hot-spot”-ok) megvizsgálva láthatjuk, hogy az esetek nagy részében hibásan jeleznek magas koncentrációjú területeket. Az 5.14. ábrán látható szén-dioxid térkép erős forrást jelez Ausztria és Olaszország határán, míg az EDGAR adatbázis szerint ott nem található kiemelkedő CO₂ forrás. Markáns hibának számít még az Észak-Lengyelországban látható hot-spot, illetve az EDGAR adatbázisban szereplő, de a szén-dioxid térkép által ki nem mutatott forrás Szlovákia és Csehország határának környékén. Az 5.14. ábra készítése során a nap 24 órájában végzett mérés mindegyikét felhasználtuk, így az éjszaka mért, helyi hatásokat tükröző mérési adatok hamis eredményt okoztak.



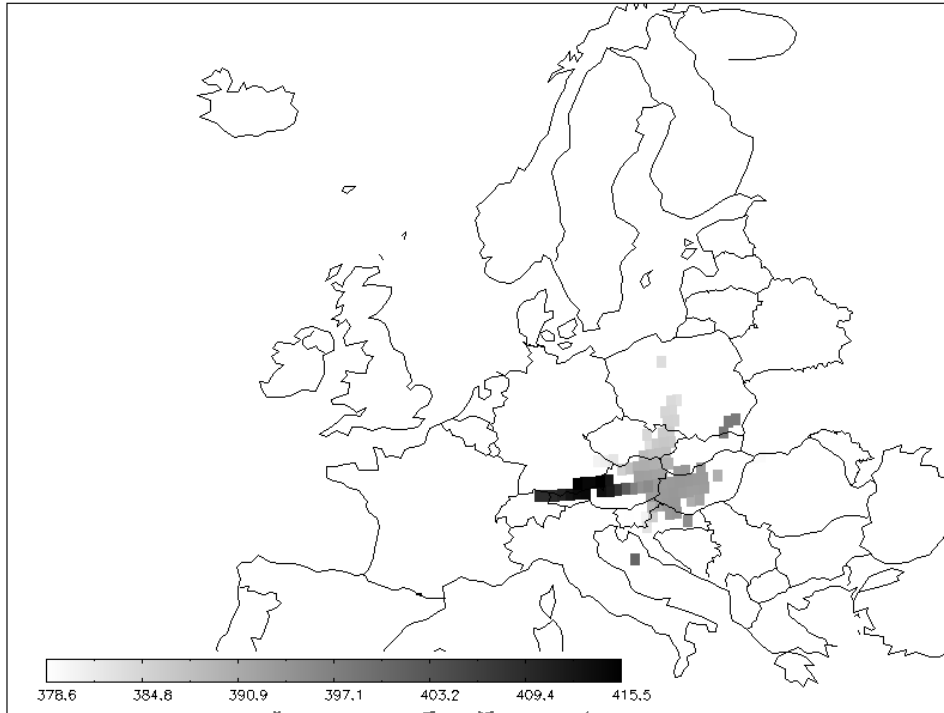
5.14. ábra: 2003 januári és februári adatokból Hegyhátsárra készített CO₂-chart, egész napi adatok felhasználásával, interpoláció nélkül.

A fentiek alapján nyilvánvaló, hogy megfelelő minőségű, értelmezhető eredmény eléréséhez mindenképpen további, fizikai folyamatokon alapuló szűrésekre, finomításokra van szükség.

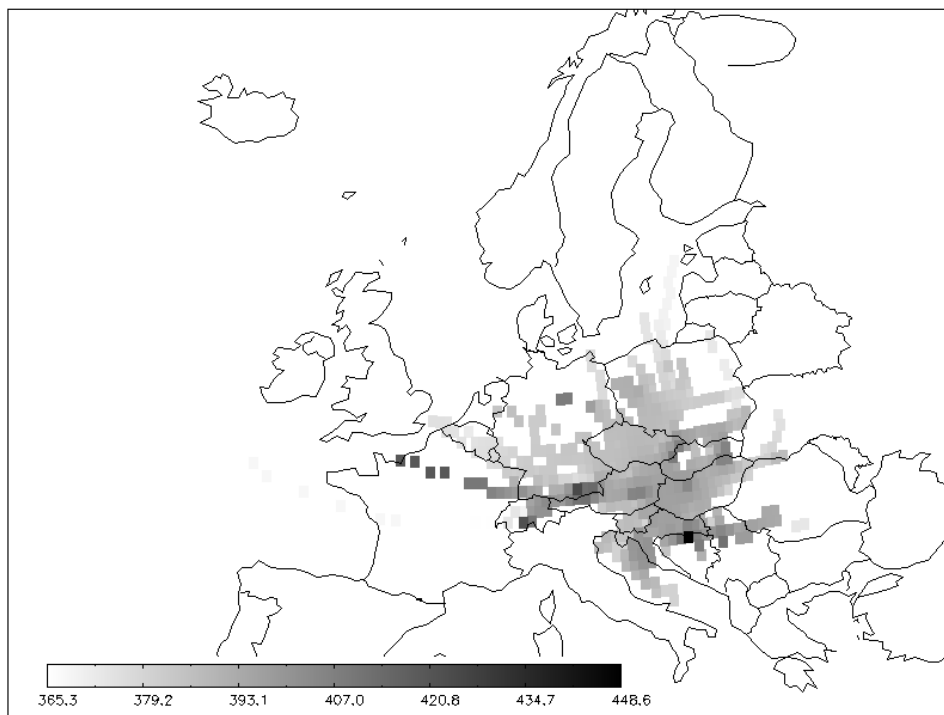
A 5.15. ábra elkészítéséhez elvégeztük ugyanerre az időszakra és állomásra a napi adatok szűrését, és csak a kora délutáni, átkevert időszak felhasználásával számítottuk ki a szén-dioxid térképet. Ebben az esetben ez a fajta szűrés információvesztést okozott, mert interpoláció nélkül mindössze egyetlen trajektória állt rendelkezésünkre a kora délutáni időszakra (15 h) naponta. A szűrések lényege, hogy a hasznos jel minél inkább megmaradjon, a zaj (vagyis a hamis helyi hatás) pedig csökkenjen. Az 5.15. ábrán látható CO₂-chart teljesen alkalmatlan az elemzésre, mivel a túl kevés adat elégtelen lefedettséget okozott és szemmel láthatóan hibásan magas koncentrációjú területeket jelez Dél-Németország, Ausztria és Svájc területén (amit a kis elemszám okoz).

A felhasználható információ mennyiségének növelése érdekében bevezettük a már említett trajektória interpolációt, mellyel a FLEXTRA által számított napi 8 trajektóriából elő tudtuk állítani egy nap 24 trajektóriáját, és így a koradélutáni időszakot már naponta 5 trajektória fedte le (13h, 14h, 15h, 16h, 17h).

A 5.16. ábrán szintén 2003 januári és februári, Hegyhátsálon végzett mérésekből és interpolált trajektóriákból készítettünk szén-dioxid térképet. A 5.15. ábrához képest jelentős mértékben nőtt a lefedettség és a 5.14.-es ábrával ellentétben ez már nem tartalmaz hamis hotspotokat.

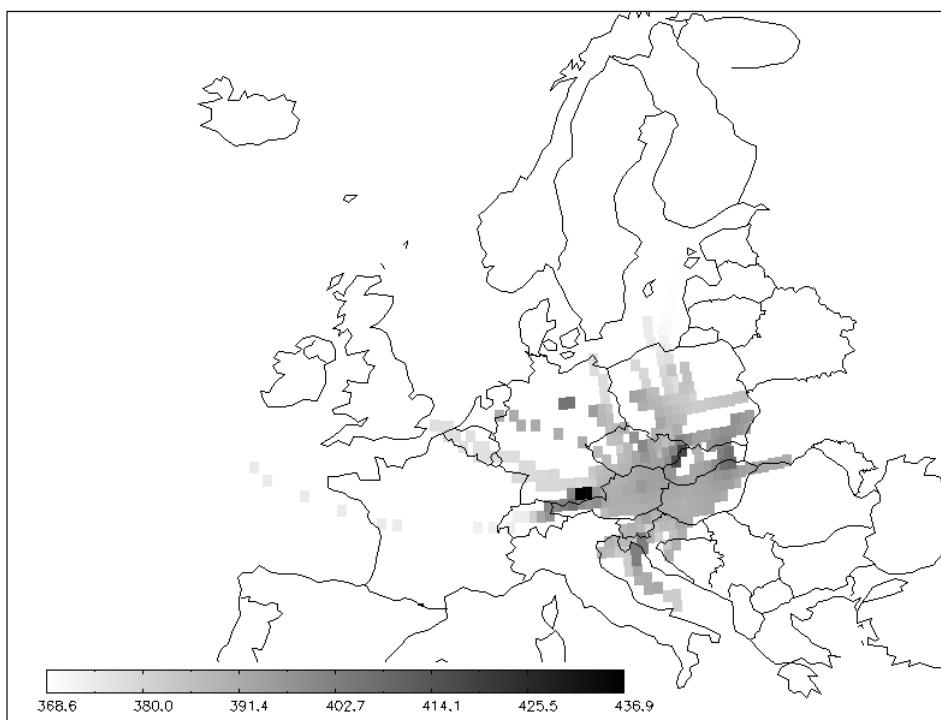


5.15. ábra: 2003 januári, februári adatokból Hegyhátsálra készített CO₂-chart, koradélutáni (13-17h) adatok felhasználásával, interpoláció nélkül.



5.16. ábra: 2003 januári, februári adatokból Hegyhátsálra készített CO₂-chart, koradélutáni (13-17h) adatok felhasználásával, interpolációval.

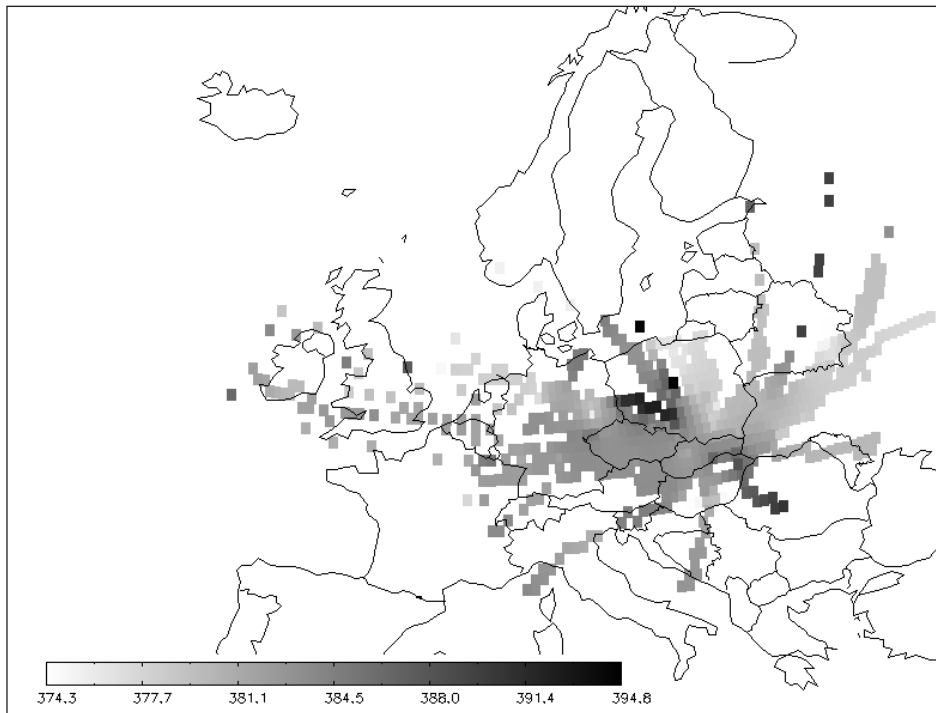
Az EDGAR adatbázissal összevetve láthatjuk, hogy a lefedett területen nagy a hasonlóság a két térkép között. A legszembevetőbb egyezések a Bécs és Budapest környékén található magasabb értékek, a Szlovákia és Csehország határán megjelenő erősebb forrás, Horvátország déli határának környékén található erőteljesebb forrás. Kicsit távolabb pedig a Dél-Németország keleti részén, illetve a Berlin környéki magasabb koncentrációjú forrásterület mutat feltűnő egyezést. Lényeges megemlítenünk még a Párizs környéki magasabb koncentrációjú területeket, melyek szintén nagy hozammal vannak feltüntetve az EDGAR szén-dioxid emisszió adatbázisban.



5.17. ábra: 2003 januári, februári adatokból Hegyhátsálra készített CO₂-chart, koradélutáni (13-17 h) adatok felhasználásával, interpolációval, ha az átlagos szélesebbég legalább 3 m/s volt, illetve a szén-dioxid koncentráció óras szórása kisebb volt mint 1,5 ppm.

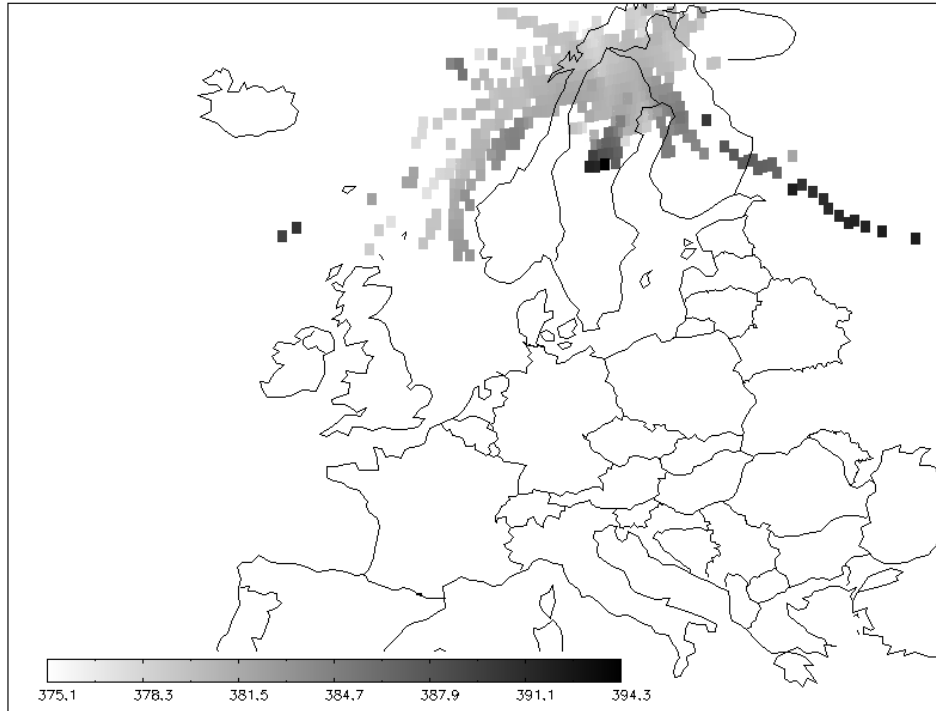
A 5.17. ábrán ugyanerre az időszakra, ugyancsak Hegyhátsálra készített szén-dioxid térkép látható, azonban a számítást kiegészítettük egy újabb szűrési eljárással. Nevezetesen itt már a mért szén-dioxid koncentráció szórásával és a mért szélesebbéggel szemben is kritériumokat támasztunk, hogy minél pontosabb szén-dioxid térképet kapjunk. Ez a fajta szűrés azon alapszik, hogy ha a szén-dioxid koncentráció szórása kicsi, illetve ha nagy a szélesebbég, akkor feltehetően inkább a nagytérségű hatások érvényesültek a mért szén-dioxid koncentráció kialakításában.

Ezek szem előtt tartásával készítettük el az 5.17. ábrán látható szén-dioxid térképet. Az így készített térkép, mint ahogy azt vártuk, kisebb területet fed le, mint a szűrés nélküli változata, azonban e kisebb területen is jóval nagyobb pontossággal bír. A legjellegzetesebb egyezések az EDGAR adatbázissal való összevetés során a dél-németországi, a horvát-tengerparti, a bécsi, a berlini és a Szlovákia és Csehország határánál található magasabb koncentrációjú területek egyezése.



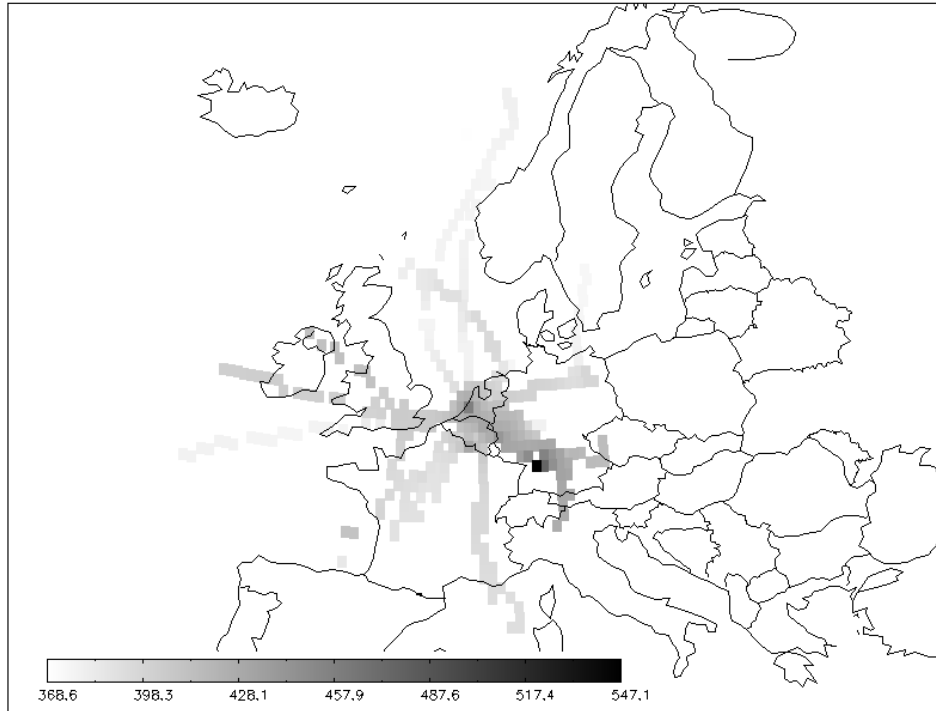
5.18. ábra: 2003 januári, februári adatokból Kasprowy Wierch-re készített CO₂-chart, koradélutáni (13-17 h) adatok felhasználásával, interpolációval.

A 5.18. ábrán a Kasprowy Wierch mérőállomás adatainak felhasználásával 2003. január-februári időszakára, koradélutáni adatok felhasználásával készített szén-dioxid térkép látható. Az EDGAR emisszió adatbázissal összehasonlítva jól láthatjuk, hogy a térkép nagyrészt helytelen, ugyanis sok helyen hibásan jelez magas koncentrációt, és csak elvétve találhatunk olyan pixeleket, ahonnan a valóságban is magasabb koncentrációjú levegő érkezett. A következtetésünk az, hogy Kasprowy Wierch adataival nem érdemes szén-dioxid térképet készíteni, mivel hegyvidéki állomásról lévén szó gyakran szabad troposzférikus levegőt mér, és ez nem hordoz annyi információt a felszíni forrásokról, hogy valóságos képet tudjunk kialakítani a szennyezettebb területek eloszlásáról.



5.19. ábra: 2003 januári, februári adatokból Pallas-ra készített CO₂-chart, koradélutáni (13-17 h) adatok felhasználásával, interpolációval.

A 5.19. ábrán a Pallas-i obszervatórium koradélutáni adatainak felhasználásával 2003. január-február időszakra készített szén-dioxid térkép látható. Az eredményt az EDGAR emisszió adatbázissal nehezebb összevetni, mivel az állomás jellegéből fakadóan e szén-dioxid térkép skálája sokkal kisebb tartományt foglal magában, mint a hegyhátsági adatokkal készített. Tovább komplikálja a helyzetet, hogy Pallas a legkevésbé szennyezett állomás a négy kiválasztott mérőhely közül, és távol helyezkedik el az erős kontinentális forrásoktól, ezért ritkábbak a kiugró értékek. Így önmagában nehezebben értelmezhető, mint a többi állomásra készített szén-dioxid térkép, azonban több állomás felhasználásával már jelentősebb szerephez juthat ez az állomás is. Ennek ellenére érdekes hot spotokat fedezhetünk fel a térképen, amik megfelelnek fosszilis eredetű CO₂ forrásoknak.



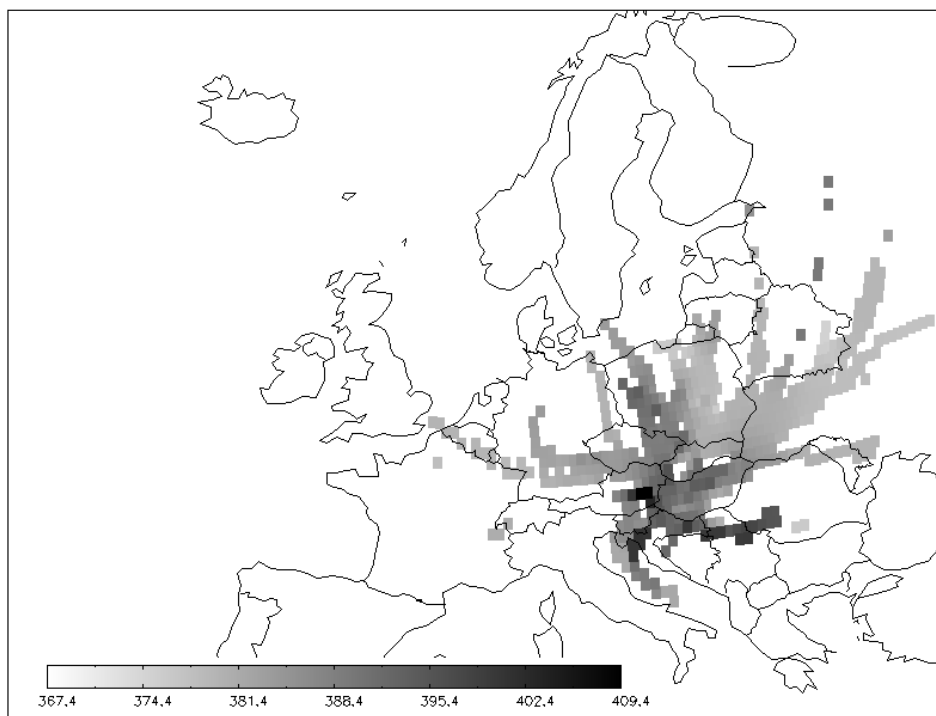
5.20. ábra: 2003 decemberi adatokból Cabauw-ra készített CO₂-chart, koradélutáni (13h-17h) adatok felhasználásával, interpolációval.

A 5.20. ábrán a Cabauw-i mérőtorony koradélutáni adatainak felhasználásával 2003. decemberi időszakára készített szén-dioxid térkép látható. A vizsgált időszak azért tér el a többitől, mert sajnálatos módon adathiány miatt nem volt alkalmunk a többi állomásra vonatkozó ugyanazon időszakra elkészíteni a szén-dioxid térképet, mint a másik három állomás esetén. Az emisszió adatbázissal összevetve jól láthatjuk, hogy a Ruhr-vidék nagy részén nagyobb koncentrációjú területeket jelez, illetve szerepel rajta egy kiemelkedően magas értékű hot-spot is, mely az általunk alkalmazott módszer hatására érhetett el ilyen mértékben kiugró értéket. Ez azt jelzi, hogy ha az adott pont felett haladt el a légréteg, akkor az esetek nagyon nagy részében kiemelkedően nagy volt az onnan érkező levegő koncentrációja.

Az ilyen jellegű extrém értékek eltűnését eredményezheti a lefedettség javulása mellett, ha több állomás adataiból próbálunk meg szén-dioxid térképet készíteni.

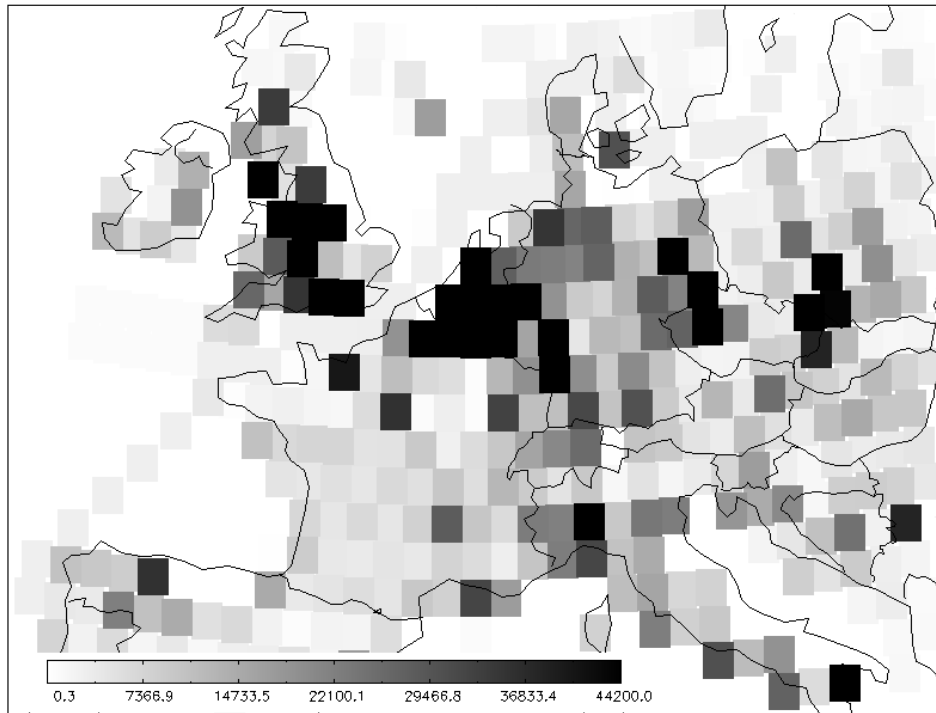
5.7. Multichart

Ebben a fejezetben a már megismert chart-algoritmust fejlesztjük tovább úgy, hogy egy szén-dioxid térkép elkészítésekor több állomás adataival dolgozunk egyszerre. Ennek optimális esetben előnye lehet a nagyobb lefedettség, illetve a sokkal pontosabb eredmény-számítása (több adat áll rendelkezésre a statisztikai vizsgálathoz). Azonban, mint arra a következő ábra kapcsán is rávilágítunk, fontos, hogy az egyes állomások önálló szén-dioxid térképe is megfelelő mennyiségű helyes információt hordozzon.



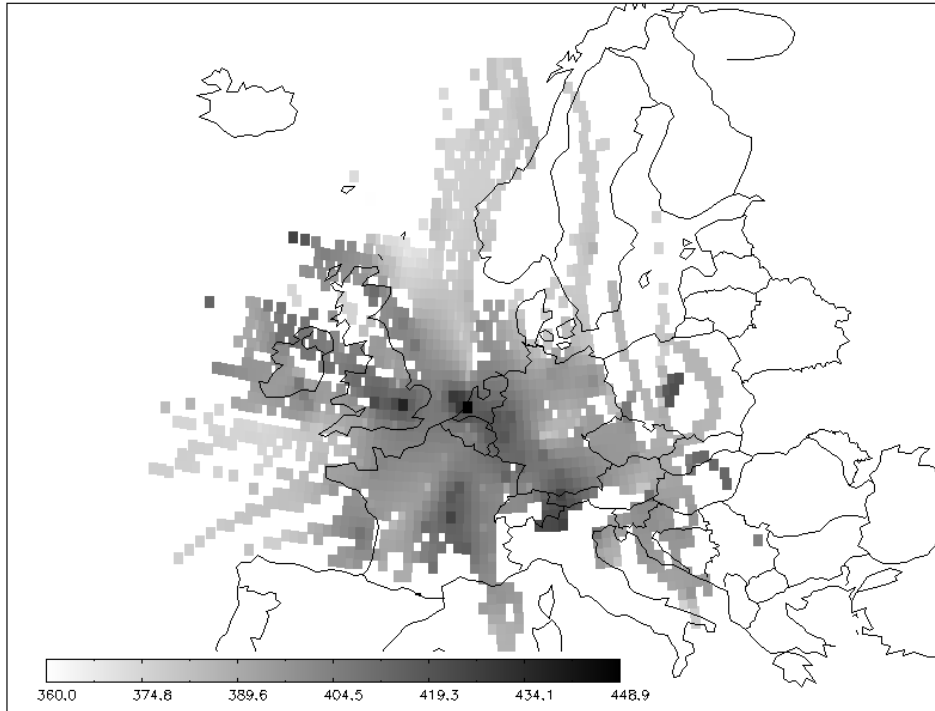
5.21. ábra: 2003 februári adatokból Kasprowy Wierch-re és Hegyhátsálra készített CO₂-chart, koradélutáni (13-17 h) adatok felhasználásával, interpolációval.

A 5.21. ábrán a Kasprowy Wierch-i és a hegyhátsáli mérőállomás adatainak felhasználásával 2003. februárra készített szén-dioxid térkép látható. Az EDGAR adatbázis térképes ábrázolásával összehasonlítva észrevehető, hogy a két állomás egy térképen való ábrázolása nem adott olyan minőségi, illetve lefedettségbeli változást, mint azt elvártuk volna. Sőt, a Kasprowy Wierch-i adatok felhasználása miatt hamis magas koncentrációjú értékeket jelentett meg a térkép.



5.22. ábra: Az egyes területek által kibocsátott szén-dioxid mennyisége [t CO₂/év], az EDGAR emisszió adatbázis alapján. (közép- és nyugat-európai kivágat)

Így e térkép elkészítéséből és vizsgálatából is azt a következtetést tudjuk levonni, miszerint nagyon fontos, hogy az egyes állomások önálló szén-dioxid térképe is megfelelő mennyiségű helyes információt hordozzon. A 5.6. fejezetben tárgyalt különálló szén-dioxid térképek vizsgálatakor már jól láthattuk, hogy a két állomás közül csak a hegyhátsági mérésekkel készített szén-dioxid térkép ad a valósághoz közeli eredményeket. Ennek megfelelően a Kasprowy Wierch-i adatokat nem használjuk fel a továbbiakban a multichart készítése során.



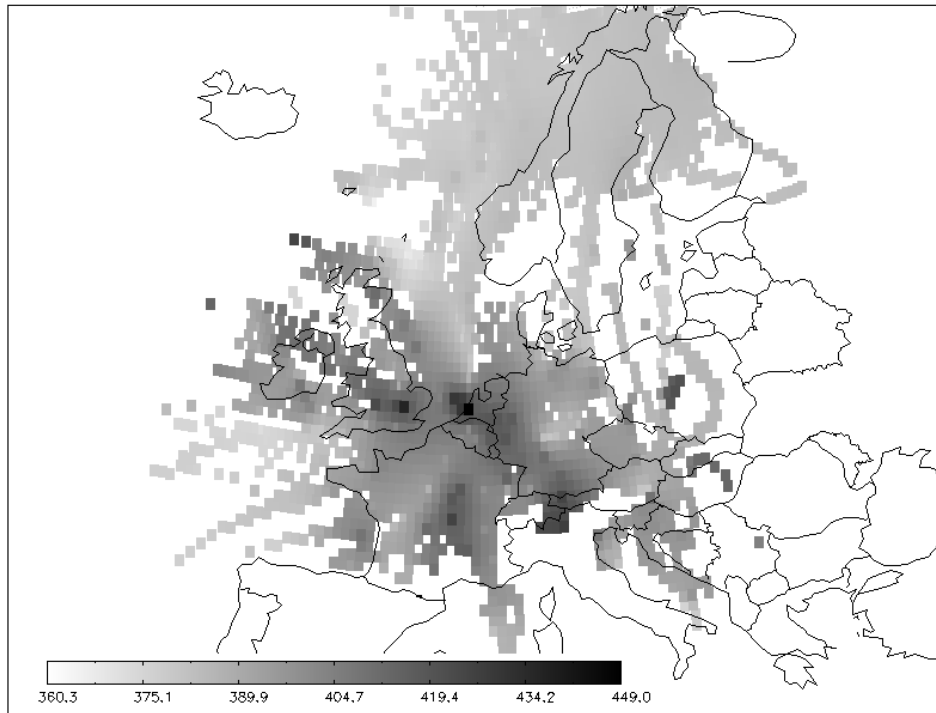
5.23. ábra: 2003 decemberi adatokból Hegyhátsálra és Cabauw-ra készített CO₂-chart, koradélutáni (13h-17h) adatok felhasználásával, interpolációval.

A 5.23. ábrán 2003. decemberi adatokból Hegyhátsálra és Cabauw-ra készített szén-dioxid térkép látható. Ha összehasonlítjuk az 5.17. és az 5.20. ábrával, jól láthatjuk, hogy sokkal informatívabb eredményt kaptunk a két állomás adatainak egyidejű felhasználásával, mint ha csak külön-külön készítettünk volna szén-dioxid térképet. A skála eltolódása miatt néhány eddig kiemelkedő hot-spot már nem vehető észre első ránézésre, azonban a térképet alaposabban szemügyre véve szépen kirajzolódnak a nagyobb ipari körzetek (London környéke, közép-Franciaország, a Ruhr-vidék és Dél-Németország.) A szén-dioxid térkép helyességét igazolja, hogy az Atlanti óceán, illetve a Jeges tenger felől alacsony szén-dioxid koncentrációjú levegő érkezését mutatja, ami megfelel a valóságnak.

A korábbi fejezetben tárgyalt önálló szén-dioxid térképekkel összehasonlítva azt is jól láthatjuk, hogy a lefedettség a pontosságot elősegítő szűrések mellett is sokkal jobb, mint az egy-egy állomás adatait használó szén-dioxid térképek esetében.

Az 5.24. ábrán az 5.23. ábrán szereplő szén-dioxid térképet bővítettük még a Pallas-i obszervatórium szén-dioxid adatsorának felhasználásával. Az EDGAR adatbázissal összevetve a kapott eredményt jól láthatjuk, hogy a modellünk segítségével mindössze három állomás adataiból pontosnak tekinthető és viszonylag jó lefedettségű, részletgazdag, informatív térképet állítottunk elő.

Az két egyesített szén-dioxid térkép legnagyobb érdekessége London környékének kirajzolódása, ugyanis, az 5.20. ábrán a közel fekvő Cabauw-i állomás adataiból készített térképen nem volt kivehető az ott elhelyezkedő erőteljesebb szén-dioxid forrás, de a hegyhátsági adatok felhasználásával, a térképen jobban tisztázódott a térség szerepe.



5.24. ábra: 2003 decemberi adatokból Pallas-ra, Hegyhátsálra és Cabauw-ra készített CO₂-chart, koradélutáni (13-17 h) adatok felhasználásával, interpolációval.

Összességében elmondható, hogy az általunk alkalmazott modell megfelelő mennyiségű és minőségű adat rendelkezésre állásakor, illetve átgondolt, fizikai szempontokat figyelembe vevő szűrési eljárás alkalmazásával képes jó közelítést adni a lefedett terület szén-dioxid koncentrációt befolyásoló hatásáról. A fenti eredmények téli időszakra vonatkoznak, amikor a fosszilis eredetű szén-dioxid kibocsátás erőteljes. További vizsgálatokra van szükség annak tisztázására, hogy más évszakban is használható-e a CO₂ chart eljárás.

6. Összefoglalás

Diplomamunkám célja az volt, hogy megismerjük, és jobban megértsük azokat a fizikai folyamatokat, amelyek a szén-dioxid koncentráció lokális változékonyságát okozzák.

Bemutattam azokat a modelleket és adatbázisokat, amelyeket a koncentráció-változások vizsgálatánál felhasználtam. Egzakt matematikai leírást adtam az ún. koncentráció hatásterület függvény meghatározásához. Ezzel a módszerrel lehetőség nyílik a szén-dioxid koncentráció mérések helyszínére érkező légtömegek eredetének, illetve hatásának feltárása, így ennek segítségével rövidebb-hosszabb időintervallumokra meghatározhattuk azt a területet, ahonnan a mért CO₂ jel változékonysága származik.

Ezután három esettanulmány segítségével megvizsgáltam, hogy a légtömegek cseréje hogyan hat a CO₂ koncentrációra Hegyhátsálon. Az elemzés rámutatott a hatásterület vizsgálatok hiányosságaira.

Ahhoz, hogy túllépjünk a koncentráció hatásterület meghatározásán, bemutattam egy olyan módszert, amellyel megvalósult a levegőelemek pályájának és a mért koncentráció értékeknek az összekapcsolása. Az eredmény egy speciális, ún. CO₂ térkép (angolul „chart”). A CO₂ térkép segítségével kvalitatív értelemben meghatározhatóvá válnak a nagy szén-dioxid emisszióval jellemezhető földrajzi területek.

A modell segítségével mindössze három mérőállomás adatsorának felhasználásával pontosnak tekinthető és viszonylag jó lefedettségű térképet állítottunk elő a forrásterületek azonosítására 2003 téli időszakban.

Fontos tapasztalat, hogy hegyvidéki állomás adatainak felhasználásával nem érdemes szén-dioxid térképet készíteni, mivel gyakran szabad troposzférikus levegő keveredik be a mérés helyszínére, és ez nem hordoz annyi információt a felszíni forrásokról, hogy valóságos képet tudjunk kialakítani a szennyezettebb területek elhelyezkedéséről.

A CO₂ térkép megalkotásával és a térkép adatainak elemzésével egy lépést tettünk afelé, hogy jobban megismerjük, megmagyarázzuk azokat a folyamatokat, amelyek a CO₂ koncentráció alakításában részt vesznek

További terveink között szerepel a szén-dioxid térkép meghatározásának pontosítása, illetve nagyobb területre való kiterjesztése.

7. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni dr. Barcza Zoltán témavezetőmnek a lelkes, türelmes, segítőkész és nem utolsó sorban hozzáértő témavezetését, valamint Dr. Haszpra László témavezetőmnek kiemelkedő szakmai tanácsait és építő jellegű kritikáit.

Továbbá ezúton szeretném megköszönni dr. Barcza Zoltánnak és Dr. Haszpra Lászlónak hogy több éven keresztül egy kiváló kutató-csoport tagja lehettem. Úgy érzem, a közös munka során rengeteg, nélkülözhetetlen tapasztalatra tettem szert.

Köszönettel tartozom Ihász Istvánnak az ECMWF MARS adatbázisához való hozzáférés lehetőségének biztosításáért, és lelkes segítségéért.

Szeretnék köszönetet mondani mindenkinek, aki ebben az 5 évben segítette tanulmányaim, munkám. Nélkülük nehezebben vagy egyáltalán nem tudtam volna végigmenni a diplomához és a diplomamunka elkészítéséhez vezető úton.

Szeretném megköszönni a Finn Meteorológiai Szolgálat munkatársának, Tuula Aalto-nak, hogy rendelkezésünkre bocsátotta a FLEXTRA modellel számított trajektóriákat.

Nem utolsó sorban az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Hivatal Légkörkutató Laboratóriumának (NOAA ARL) szeretném megköszönni, hogy a rendelkezésünkre bocsátotta a HYSPLIT_4 trajektória és diszperzió modellt, valamint, hogy lehetővé tette a READY honlapjáról (<http://www.arl.noaa.gov/ready.html>) származó információk használatát jelen dolgozatban.

Irodalomjegyzék

Aalto, T., Hatakka, J., Paatero, J., Tuovinen, J.-P., Aurela, M., Laurila, T., Holmén, K., Trivett, N. and Viisanen, Y., 2002. Tropospheric carbon dioxide concentrations at a northern boreal site in Finland: basic variations and source areas. *Tellus*, 54B(2),110-126.

Apadula, F., Gotti, A., Pignini, A., Longhetto, A., Rocchetti, F., Cassardo, C., Ferrarese, S., Forza, R., 2003. Localization of source and sink regions of carbon dioxide through the method of the synoptic air trajectory statistics. *Atm. Env.*, 37, 3757–3770.

Cotton, W. R., Alexander, G. D., Hertenstein, R., Walko, R. L., McAnelly, R. L. and Nicholls M., 1995. Cloud venting - A review and some new global annual estimates. *Earth Sci. Rev.*, 39, 169-206.

Draxler, R.R. and Taylor, A.D. 1982. Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling. *J. Appl. Meteorol.*, 21, 367-372.

Draxler, R.R. and Stunder, B.J.B., 1988. Modeling the CAPTEX vertical tracer concentration profiles. *J. Appl. Meteorol.*, 27, 617-625.

Draxler, R.R., 1990. The calculation of low-level winds from the archived data of a regional primitive equation model. *J. Appl. Meteorol.*, 29, 240-248.

Draxler, R.R., 1992. Hybrid single particle Lagrangian integrated trajectories (HY-SPLIT) Version 3.0 – User's guide and model description. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-195, 26 p.

Draxler, R.R., 1996. Boundary Layer Isentropic and Kinematic Trajectories during the August 1993 NARE Intensive. *J. Geophys. Res.*, 101, 29, 255-29, 268.

Draxler, R.R and Hess, G.D., 1997. Description of the HYSPLIT_4 modelling system. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, December, 24pp.

Duska, G., Ferenczi, Z., Ihász, I., 1998. A május végén az Ibériai-félszigeten történt nukleáris szennyeződés hatásának tanulmányozása. Esettanulmány, OMSZ.

Ferrarese, S., Longhetto, A., Cassardo, C., Apadula, F., Bertoni, D., Giraud, C., Gotti, A., 2002. A study of seasonal and yearly modulation of carbon dioxide sources and sinks, with a particular attention to the Boreal Atlantic Ocean. *Atm. Env.*, 36, 5517-5526.

GLOBALVIEW-CO₂, 2003. Cooperative Atmospheric Data Integration Project – Carbon Dioxide., CD-ROM. NOAA/CMDL, Boulder, CO₂. (Also available on the Internet via anonymous FTP to <ftp.cmdl.noaa.gov>, Path: [ccg/co2/GLOBALVIEW](ftp://ccg/co2/GLOBALVIEW)).

Gloor, M., Bakwin, P., Hurst, D., Lock, L., Draxler, R. and Tans, P., 2001. What is the concentration footprint of a tall tower? *J. Geophys. Res.*, 106, 17831-17840.

Hahn, C.J., Merrill, J.T., and Mendoca, B.G., 1992. Meteorological Influences during MLOPEX. *J. Geophys. Res.*, 97, 10291-10309.

Haszpra, L., 1995. Carbon dioxide concentration measurements at a rural site in Hungary. *Tellus*, 47B, 17-22.

Haszpra, L., 1999a. Measurements of atmospheric carbon dioxide at a low elevation rural site in Central Europe. *Időjárás*, 103, 93-106.

Haszpra, L., 1999b. On the representativeness of carbon dioxide measurements. *J. Geophys. Res.*, 104D, 26953-26960.

Haszpra, L., Barcza, Z., 2001a. A magyarországi légkör/bioszféra szén-dioxid fluxusmérések eredményei. *Fizikai Szemle*, 2001/2, 50-52.

Haszpra, L., Barcza, Z., 2001b. A bioszféra és a légkör közötti szén-dioxid-csere Magyarországon. *Magyar Kémikusok Lapja*, 56, 423-425.

Haszpra, L., Barcza, Z., Bakwin, P. S., Berger, B. W., Davis, K. J., Weidinger, T., 2001. Measuring system for the long-term monitoring of biosphere/atmosphere exchange of carbon dioxide. *J. Geophys. Res.*, 106D, 3057-3070.

Haszpra, L., 2005. Emlékezés C. D. Keelingre, a szén-dioxid kutatás kiemelkedő személyiségére. *Léggör*, 50/3, 18-19.

Hurwitz, M. D., Ricciuto, D. M., Bakwin, P. S., Davis, K. J., Wang, W., Yi, C. and Butler, M. P., 2004. Transport of Carbon Dioxide in the Presence of Storm Systems over a Northern Wisconsin Forest. *J. of the Atmospheric Sciences*, 61, 607-618.

IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. (eds. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C. A.). Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, U.S.A. 881pp.

Ihász, I., 1992. Isobaric and isentropic objective analysis of meteorological fields for regional and continental scale trajectories. *Időjárás*, 96, 81-92.

Iványi, Zs. and Mersich, I., 1984. A climatological analysis of two and four day backward trajectories. *Időjárás*, 88, 145-153.

Kahl, J.D., Harris, J.M. and Herbert, G.A., 1989. Intercomparison of three long-range trajectory models applied to Arctic haze. *Tellus*, 41B, 524-536.

Klemm, O., Bachmeier, A.S., Talbot, R.W. and Klemm, K.I., 1994. Fog chemistry at the New England coast: influence of fair mass history. *Atm. Env.*, 28, 1181-1188.

Olivier, J.G.J. and Berdowski, J.J.M., 2001. Global emissions sources and sinks. In: Berdowski, J., Guicherit, R. and B.J. Heij (eds.) "The Climate System", pp. 33-78. A.A. Balkema Publishers/Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, The Netherlands. ISBN 90 5809 255 0.

Moy, L.A., Dickerson, R.R., Ryan, W.F., 1994. Relationship between back trajectories and tropospheric trace gas concentrations in rural Virginia. *Atm. Env.*, 28, 2789-2800.

Seibert, P., Kromp-Kolb, H., Baltensperger U., Jost D. T., Schwikowski M., Kasper A. and Puxbaum H. 1994. Trajectory analysis of aerosol for providing the sites. In: Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere (edited by Borrell P.M., Borrell, P., Cvitai, T. and Seiler, W.), pp. 689-693. Academic Publishing, Den Haag.

Shipman, M.C., Bachmeier, A.S., Cahoon, D.R., and Browell, E.V., 1992. Meteorological overview of the Arctic boundary layer expedition (ABLE 3A) Flight Series. *J. Geophys Res.*, 97, 16395-16419.

Stohl, A., Wotawa, G., Seibert, P. and Kromp-Kolb, H., 1995. Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories. *J. Appl. Meteor.*, 34, 2149-2165.

Stohl, A., 1996. Trajectory statistics - a new method source-receptor relations of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe. *Atm. Env.*, 30, 579-587.

Stohl, A., and Seibert, P., 1998. Accuracy of trajectories as determined from the conservation of meteorological tracers. *Q. J. Roy. Met. Soc.* 124, 1465-1484.

Stull, R. B., 1988. An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Acad., Norwell, Mass. pp 666.

Szabó, T., 2004. A HYSPLIT_4 Trajektória modell adaptálása és alkalmazása. Tudományos Diákköri Dolgozat (témavezetők: Barcza Zoltán, Haszpra László).

Szabó, T., 2006. A szén-dioxid változékonyság vizsgálata toronymérés alapján. Tudományos Diákköri Dolgozat (témavezetők: Barcza Zoltán, Haszpra László).

Tans, P. P., 1991. An observational strategy for assessing the role of terrestrial ecosystems in the global carbon cycle: scaling down to regional levels. In: *Scaling Processes Between Leaf and Landscape Levels* (eds.: Ehleringer, J. and Field, C.), Academic Press, New York, 71-105.

Tóth, H., 2000. Trajektóriamodellek alkalmazása a nagyskálájú szennyezőanyag-szállítás leírásában. Szakdolgozat, Budapest, p33.