

MODELOVÁNÍ MEZNÍ VRSTVY ATMOSFÉRY S APLIKACEMI NA PROBLÉMY ČISTOTY OVZDUŠÍ

Disertační práce

Jan Macoun



Katedra meteorologie a ochrany prostředí
Matematicko-fyzikální fakulta
Univerzita Karlova v Praze

Srpen 1999

Školitel: RNDr. Josef Keder, CSc.
Český hydrometeorologický ústav, Praha

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a pouze s použitím uvedené literatury.
Souhlasím se zapůjčováním práce pro studijní účely.

V Praze dne 10.srpna 1999

Jan Macoun

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli RNDr. Josefu Kederovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi poskytl při vypracování disertační práce.

Děkuji

OBSAH

Úvod.....	iv
1. Problematika znečištění ovzduší.....	1
1.1. Kontinuální zdroje	1
1.1.1. Základní znečišťující látky.....	1
1.1.1.1. Sloučeniny síry.....	1
1.1.1.2. Sloučeniny dusíku	2
1.1.1.3. Sloučeniny uhlíku	2
1.1.1.4. Ozon.....	3
1.1.1.5. Atmosférický aerosol	3
1.1.2. Vývoj znečištění	4
1.1.2.1. Vývoj emisí v Evropě.....	4
1.1.2.2. Vývoj emisí v České republice.....	5
1.2. Okamžité zdroje.....	7
1.2.1. Znečišťující látky	7
1.2.1.1. Úniky z chemických zařízení	7
1.2.1.2. Radioaktivní látky	8
1.2.2. Nejvýznamnější úniky s dopadem na větší území	8
2. Modelování znečištění.....	9
2.1. Význam modelování rozptylu znečištění	9
2.2. Modely transportu a rozptylu	9
2.2.1. Rozdělení modelů podle horizontálního dosahu.....	9
2.2.2. Dělení modelů podle fyzikálního přístupu	9
2.2.2.1. Eulerovské modely.....	10
2.2.2.2. Lagrangeovské modely	11
2.2.2.3. Gaussovské modely.....	12
2.2.2.4. Puff modely.....	13
2.3. Problémové okruhy dálkového transportu znečištění.....	14
3. Popis použitého modelu.....	15
3.1. Souřadný systém modelu	15
3.1.1. Horizontální projekce.....	15
3.1.2. Vertikální souřadný systém.....	16
3.2. Advekce oblaku	16
3.3. Stabilita.....	17
3.4. Frikční rychlost a teplota	17
3.5. Výška směšovací vrstvy.....	18
3.5.1. Metoda založená na vertikálním gradientu teploty.....	18
3.5.2. Odhad založený na Richardsonově čísle pro vrstvu	18

3.5.3.	Modifikovaná metoda vertikálního teplotního gradientu.....	19
3.5.4.	Konstantní výška.....	19
3.6.	Rozptyl znečištění.....	19
3.6.1.	Štěpení oblaků.....	19
3.6.2.	Rozptyl v subgidovém měřítku.....	21
3.6.2.1.	Metoda použitá v původním modelu.....	21
3.6.2.2.	Parametrizace založená na Moninově a Obuchovově teorii.....	22
3.6.2.3.	Metodika SYMOS'97.....	23
3.7.	Depozice.....	23
3.7.1.	Suchá depozice.....	24
3.7.1.1.	Depoziční rychlost.....	24
3.7.1.2.	Resistance.....	24
3.7.1.3.	Gravitační usazování.....	26
3.7.2.	Mokrá depozice.....	27
3.8.	Radioaktivita.....	28
4.	Charakteristiky terénu.....	29
4.1.	Terén.....	29
4.2.	Pokryv terénu.....	29
4.3.	Parametr drsnosti.....	29
5.	Statistické metody hodnocení modelu.....	31
5.1.	Rozptylový diagram.....	31
5.2.	Korelační koeficient.....	31
5.3.	Vychýlení.....	32
5.4.	Normalizovaná střední kvadratická odchylka.....	32
5.5.	Procentuální shoda (Figure of merit).....	32
6.	Experiment ETEX.....	33
6.1.	Pozadí experimentu.....	33
6.2.	Meteorologické podmínky.....	34
6.2.1.	1. experiment.....	35
6.2.2.	2. experiment.....	35
6.3.	Pohyb oblaku.....	46
6.3.1.	1. experiment.....	46
6.3.2.	2. experiment.....	46
6.4.	Závěry z experimentu.....	54
6.5.	Hodnocení použitého modelu s využitím databáze ETEX.....	54
6.5.1.	ETEX 1.....	54
6.5.2.	ETEX 2.....	78
7.	ATMES (Černobylská havárie).....	82
7.1.	Pozadí studie.....	82

7.2.	Databáze studie	83
7.2.1.	Emise ze zdroje	83
7.2.2.	Meteorologické údaje.....	84
7.2.3.	Měřené koncentrace izotopů v ovzduší	84
7.2.4.	Měřené koncentrace depoziční aktivity	85
7.3.	Výsledky modelu	86
8.	Testovací výpočet na území ČR	91
	Závěr.....	94
	Literatura.....	96
	Seznam tabulek.....	99
	Seznam obrázků.....	100

ÚVOD

Český hydrometeorologický ústav poskytuje, mimo jiné, jakožto odborná základna Ministerstva životního prostředí, informace o životním prostředí. Do této oblasti spadá i predikce transportu a rozptylu znečišťujících látek v případě velkých havárií na chemických nebo jaderných zařízeních. Pro tyto účely poskytla ARL NOAA (Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration) ČHMÚ Lagrangeovký model HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory).

Před jeho operativním nasazením v rámci ústavu bylo vhodné ověření výpočetních postupů a možnost využití modelu v oblasti střední Evropy. K ověření spolehlivosti výsledků byla využita databáze získaná v rámci experimentu ETEX (European Tracer EXperiment), kterého se Český hydrometeorologický ústav aktivně účastnil, a to jak v jeho měřicí fázi (na území republiky byly rozmístěny čtyři monitorovací stanice), tak v modelové fázi. (Pro výpočty v průběhu experimentu byl použit jednoduchý puff model, který pracoval na základě předpovědního modelu ČHMÚ. Kvalita modelových výsledků nebyla příliš uspokojivá. To byl také jeden z impulsů pro hledání vyspělejšího modelu.)

Model HYSPLIT je v současné době upravován v rámci projektu VaV/520/2/98 tak, aby byl schopen modelovat jednak štěpné procesy radioaktivních materiálů a jednak chemické reakce, ke kterým v atmosféře dochází.

Cílem této práce tedy bylo ověřit chování modelu a otestovat některé další parametrizace atmosférických procesů. Pro porovnání byly ověřeny čtyři metody výpočtu výšky směšovací vrstvy a tři postupy stanovení rozptylových parametrů. Výsledky byly podrobně zpracovány pro experiment ETEX 1 (druhý experiment přinesl řadu problémů, které se dosud v mezinárodním měřítku nepodařilo uspokojivě vyřešit). Na případu jaderné havárie v Černobylské elektrárně byla demonstrována schopnost modelu stanovovat depozici znečišťující látky na zemském povrchu a konečně je připojena i ukázka výpočtu pole koncentrací na menší oblasti (severozápadní Čechy).

1. PROBLEMATIKA ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ

V souvislosti s rozvojem průmyslové výroby a nárůstem dopravy dochází ke stále většímu znečišťování atmosféry. Většina takovýchto zdrojů je v činnosti po velkou část roku (průmyslová výroba, produkce energie, doprava, zemědělství...). Význam mají ale i krátkodobé úniky znečištění spojené často s haváriemi na výrobních zařízeních. V obou případech dochází, v závislosti na velikosti zdroje a meteorologických podmínkách, k ovlivňování životního prostředí v nejbližším okolí nebo i ve velkých vzdálenostech.

1.1. Kontinuální zdroje

Do této kategorie patří většina běžných zdrojů, které emitují znečišťující látky do atmosféry celoročně eventuelně v nějakém pravidelném režimu (sezónní zdroje, zdroje pracující v jednosměnném režimu...). Množství emitované látky se pohybuje většinou řádově v jednotkách až desítkách gramů za sekundu (u velkých zdrojů – např. elektráren – však může být emise o jeden až dva řády vyšší). Vliv takovýchto zdrojů na okolí je pozorovatelný především v dlouhodobém měřítku.

1.1.1. Základní znečišťující látky

Kontinuální zdroje je možno spojit zejména s „klasickými“ znečišťujícími látkami, které jsou v rozvinutých zemích sledovány po řadu let. Jedná se zvláště o sloučeniny síry, dusíku a uhlíku. V posledních letech nabývají na významu i prekursorů ozonu a produkty fotochemických reakcí.

1.1.1.1. Sloučeniny síry

V atmosféře se z plyných sloučenin síry vyskytují zejména oxid siřičitý a sirovodík. Síra vystupuje i v podobě aerosolu (síranový anion) a též v kapalně podobě ve srážkách (kyselina sírová). Je důležitým biogenním prvkem, avšak při zvýšených koncentracích má negativní účinky.

Nejvýznamnější sloučeninou síry z hlediska vlivu na životní prostředí je oxid siřičitý, jehož největším zdrojem je spalování fosilních paliv obsahujících síru. (Přirozeným zdrojem je např. vulkanická činnost.) Při dýchání je oxid siřičitý absorbován na sliznicích horních cest dýchacích. Vystavení organismu dlouhodobému působení vyšších koncentrací SO_2 může vést ke vzniku chronické bronchitidy a dalších nemocí spojených s dýchacím ústrojím. Rizikový je zejména pro astmatiky. Vysoké koncentrace oxidu siřičitého mají negativní vliv i na rostliny. V závislosti na množství přijatého oxidu siřičitého dochází k různým účinkům (rozklad chlorofylu, snížení fotosyntézy, zvýšená respirační rychlost...). Průměrná roční koncentrace

oxidu siřičitého se v čistých oblastech pohybuje mezi $0,5\text{--}5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, v průmyslových oblastech jsou měřené hodnoty až o jeden řád vyšší. Koncentrace SO_2 s výškou klesají.

1.1.1.2. *Sloučeniny dusíku*

Dusík tvoří převážnou část zemské atmosféry. Jedná se o jeden z nejdůležitějších biogenních prvků. Z plyných sloučenin dusíku se v atmosféře vyskytují především oxid dusný, dusnatý a dusičitý, dále amoniak. Sloučeniny dusíku se mohou vyskytovat i ve formě aerosolů (dusičnany, amonné ionty).

Antropogenním zdrojem oxidu dusnatého jsou spalovací procesy při vysokých teplotách (energetika, doprava). Část pochází i z přírodních zdrojů. Ve znečištěné atmosféře, za přítomnosti UV záření a ozonu, poměrně rychle oxiduje na oxid dusičitý. Přízemní koncentrace NO se v čistých oblastech pohybují mezi $0,5 - 3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, v blízkosti významných komunikací překračují hodnotu $100\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Oxid dusičitý vzniká z velké části jako produkt oxidace primárně emitovaného oxidu dusnatého. Jsou prokazatelné jeho nepříznivé důsledky na živý organismus (ovlivňuje činnost plic, důsledkem delšího pobytu v prostředí s vysokými koncentracemi mohou být i změny na slezině, játrech a krvi). V atmosféře se NO a NO_2 nevyskytují samostatně a většinou se uvažují společně jako suma oxidů dusíku NO_x . Oxidy dusíku mají nepříznivý vliv také na vegetaci, kdy se při expozici snižuje růst, zmenšuje se odolnost rostlin. Problematická je také přítomnost dusíkatých sloučenin ve srážkách. Odhaduje se, že se na celkové kyselosti podílejí cca. 30%.

Oxidy dusíku jsou v atmosféře postupně transformovány na dusičnany. Tyto reakce jsou podporovány přítomností UV záření a ozonu. Jejich průběh a rychlost závisí i na složení atmosféry.

1.1.1.3. *Sloučeniny uhlíku*

Uhlík je v atmosféře zastoupen především ve formě oxidu uhličitého a dále jako oxid uhelnatý a vystupuje i v organických sloučeninách. Jeho sloučeniny mají velký biogenní význam.

Oxid uhličitý má nezastupitelnou úlohu v biochemických cyklech. Jeho nejdůležitějším zdrojem je dýchání živých organismů, v posledních letech se ale zvyšuje podíl antropogenních zdrojů (spalovací procesy). Oxid uhličitý silně absorbuje záření v infračervené oblasti, což může přispět k zesílení skleníkového efektu v atmosféře.

Oxid uhelnatý je toxický plyn, který se při vdechování váže místo kyslíku na hemoglobin, čímž zamezuje přenos kyslíku krví. Největší část pochází z antropogenních zdrojů (nedokonalé spalování). Významným zdrojem je automobilová doprava, kdy podíl uvolněného oxidu uhelnatého roste zejména při neplýnulém provozu, který je typický pro města. Tam se také podílí stále ve větší míře na znečištění ovzduší. Byly popsány čtyři typy zdravotních účinků: kardiovaskulární, neurologické, fibrinolytické a perinatální (snížení porodní váhy, zpožděný vývoj...).

Nejvýznamnějším uhlovodíkem v atmosféře je metan. Samotné uhlovodíky jsou relativně málo toxické. Jejich škodlivost je spojena s fotochemickou aktivitou za přítomnosti slunečního záření a oxidů dusíku. Produktem těchto reakcí jsou fotochemické oxidanty (zejména ozon). Ty dráždí sliznice a to zvláště při vyšších koncentracích (smogové situace letního typu). Zdrojem uhlovodíků jsou spalovací procesy, ve městech pak automobilová doprava.

1.1.1.4. Ozon

Je přirozenou součástí atmosféry, kde se vyskytuje především ve vyšších hladinách (ozonoféra). Zde slouží jako filtr slunečního záření, kdy zachytává škodlivé složky UV záření slunečního záření. Vlivem emisí freonů a dalších látek dochází v posledních letech k narušení této vrstvy, což může mít nepříznivý vliv na člověka i celou přírodu.

Ozon se dále vyskytuje v přízemních hladinách atmosféry, kde má nežádoucí účinky a vystupuje zde tedy jako znečišťující látka. Jeho tvorba je podmíněna přítomností slunečního záření, oxidů dusíku a těkavých organických látek. Neexistují žádné významné přímé antropogenní emise ozonu do ovzduší. Modelování vzniku a rozptylu ozonu vyžaduje tedy modely se zabudovaným chemizmem. Účinky ozonu na lidský organismus jsou spojeny především s poškozením plicních funkcí.

Zvláště citlivé na ozon a další fotooxidanty jsou rostliny. K příjmu těchto látek rostlinami dochází zejména procesem výměny stomaty. Dochází k poškození listů a jehličí poškozením celistvosti buněčných membrán, zasaženy jsou ale i metabolické pochody.

1.1.1.5. Atmosférický aerosol

Podle mechanismu vzniku je možno rozdělit atmosférický aerosol na tři základní skupiny:

1. **Kondenzační aerosol**, který vzniká kondenzací přesycených par nebo plynů při atmosférických reakcích plynů v atmosféře. Tímto způsobem vznikají relativně malé částice (0,005 – 0,1 μm), které se v ovzduší chovají podobně jako plyny.

2. **Koagulační částice** vznikají slučováním menších částic. Rychlost vzniku i odstraňování těchto částic je poměrně pomalá, takže setrvávají v atmosféře až desítky dnů. Velikost takto vzniklých částic je v rozmezí 0,1 – 2 μm .

Tyto dvě skupiny se společně označují jako **jemné částice**.

3. **Obří částice** se nazývá ta část spektra pevných látek v atmosféře, která má rozměry větší než 2 μm . Do ovzduší se dostávají především primárními pochody (mechanicky) a poměrně rychle gravitačně sedimentují. Co do počtu je těchto částic výrazně méně než jemných, ale mohou představovat i nadpoloviční část celkové hmotnosti prašného aerosolu.

Chemické reakce plyn – částice se obvykle vyskytují na povrchu jemných částic. Obří částice se chemických reakcí účastní minimálně, ale vystupují jako kondenzační jádra, a tak napomáhají tvorbě oblačnosti. Z hlediska vlivu na zdraví člověka jsou mnohem nebezpečnější menší částice, které jsou vdechovány do plic a způsobují respirační potíže. Chemické složení částic závisí na jejich původu. Přírozený aerosol je možno orientačně rozdělit na mořský a kontinentální. Antropogenní aerosol vykazuje zvýšené množství sulfátů a těžkých kovů. Výrazný vliv na úroveň lokální prašnosti má sekundární prašnost (víření prachu z mechanických příčin – vítr, automobilová doprava, ...). Koncentrace aerosolu v ovzduší závisí na vzdálenosti od zdrojů znečištění. Přírozené pozadí má na pevnině hodnotu 3 – 6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.1.2. Vývoj znečištění

V osmdesátých letech narostly ve vyspělých zemích problémy spojené se znečištěním ovzduší do velkých rozměrů. Průmyslové oblasti byly často postihovány smogovými situacemi, objevil se problém dálkového transportu znečištění a kyselých dešťů. To vedlo k rozvoji snah o řešení problematiky znečištění ovzduší. Postupně se přechází na spalování ušlechtilých paliv, jsou vyvíjena méně energeticky náročná zařízení a přistupuje se k čištění spalin odcházejících ze zdrojů (prachové filtry, desulfurizace). V devadesátých letech je již patrný výsledek tohoto úsilí na poklesu emisní i imisní zátěže. Na druhou stranu v tomto období dochází k prudkému rozvoji automobilové dopravy, který provázejí zvýšené emise oxidů dusíku, oxidu uhelnatého a uhlovodíků. Ty mají za následek častější výskyty letního fotochemického smogu.

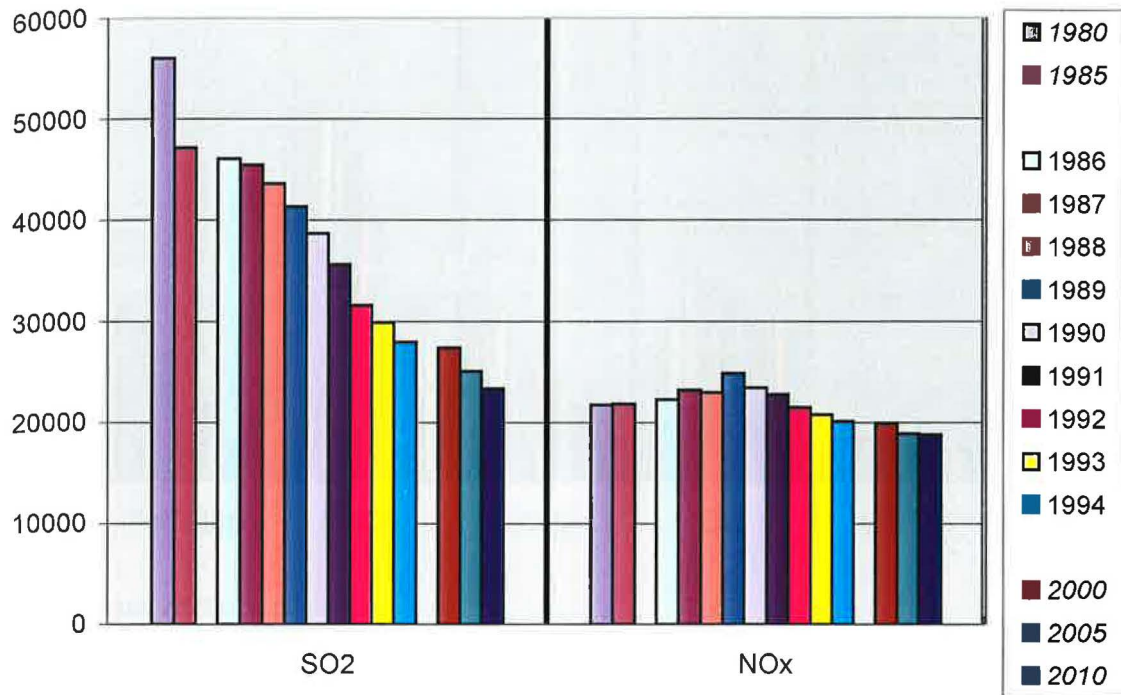
Tyto trendy jsou zřetelně patrné na grafech vývoje emisní situace v Evropě a v České republice, které jsou uvedeny v následujících kapitolách.

1.1.2.1. Vývoj emisní v Evropě

Jednou z mezinárodních aktivit zabývajících se problematikou znečištění ovzduší je program EMEP (Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollution in Europe). Jeho součástí je i shromažďování dat o emisích v rámci

působnosti tohoto programu¹. Souběžně je prováděn monitoring úrovně znečištění a modelování dálkového transportu znečištění.

obrázek 1 Vývoj celkové emisní zátěže síry (ve formě SO₂) a oxidů dusíku (ve formě NO_x) v kt/rok v zemích projektu EMEP (včetně námořní dopravy v odpovídající oblasti)



Přirozená emise SO₂ z moří a oceánů (uvnitř oblasti EMEP) byla odhadnuta na 724 kt/rok a z vulkanické činnosti na 570 kt/rok.

1.1.2.2. Vývoj emisí v České republice

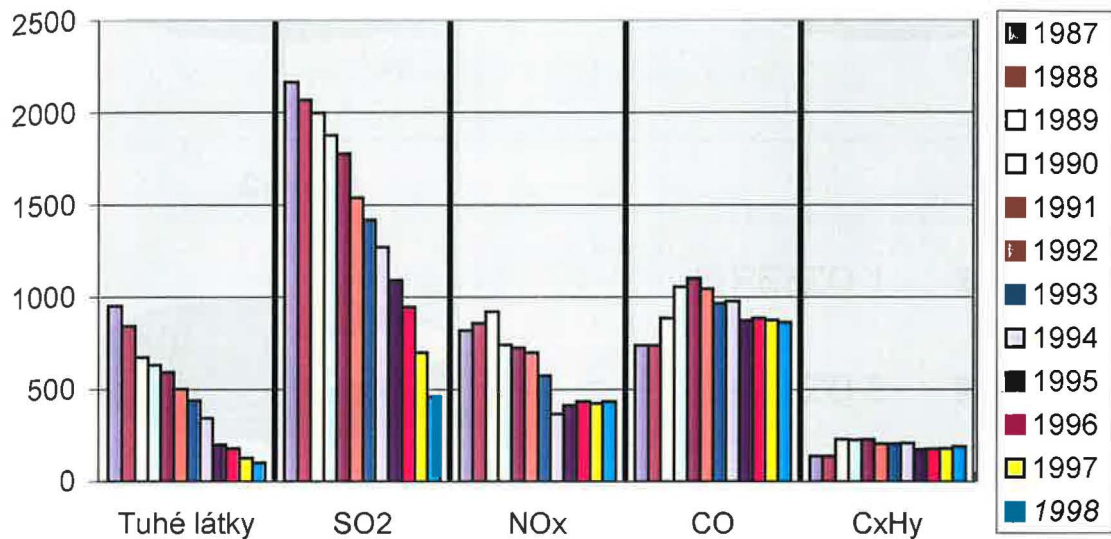
V posledních letech dochází k redukci emisí klasických znečišťujících látek (oxid siřičitý, prašný aerosol...). Tento pokles souvisí s jednak s propadem průmyslové výroby po roce 1990 ale je také v nezanedbatelné míře důsledkem opatření prováděných na jednotlivých zdrojích znečištění. V České republice musí od 1.1.1999 všechny zdroje splňovat emisní limity uvedené ve vyhlášce². Tyto limity není možné dodržet bez úpravy stávajících uhelných zdrojů (odsíření nebo přechod na ušlechtilá paliva). V současné době (v roce 1999) jsou tedy již odsířeny všechny významné zdroje na území republiky a velká část malých zdrojů (lokální a komunální zdroje) byla převedena na ušlechtilá paliva). To je velmi dobře patrné na měřených hodnotách emisní zátěže. Významný pokles byl zaznamenán zejména v podkrušnohorské pánvi. Zatímco v roce 1993 zde byly naměřeny nejvyšší průměrné roční koncentrace mezi 80 – 90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, v roce 1998 jsou hodnoty přibližně třetinové (pod 30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Naproti tomu, v souladu s evropskými

¹ Program EMEP pokrývá oblast Evropy, severní Afriky a Turecka

² Vyhláška Ministerstva životního prostředí ze dne 12.května 1997, číslo 117/1997 Sb.

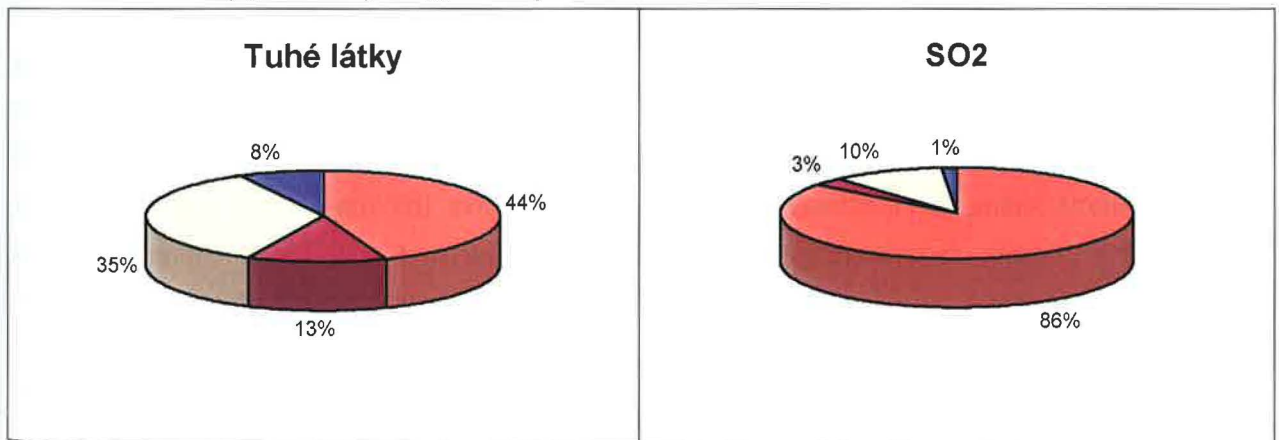
trendy, emise látek produkovaných při automobilové dopravě stagnují nebo mírně rostou (oxidy dusíku, uhlovodíky, oxid uhelnatý) obr. 2 a 3.

obrázek 2 Vývoj emisí základních škodlivin v České republice v letech 1987 – 1998 [kt/rok] (zdroj ročenka ČHMÚ)



*) údaje pro rok 1998 jsou předběžné

obrázek 3 Podíly jednotlivých typů zdrojů REZZO³ na celkové emisní zátěži v roce 1997



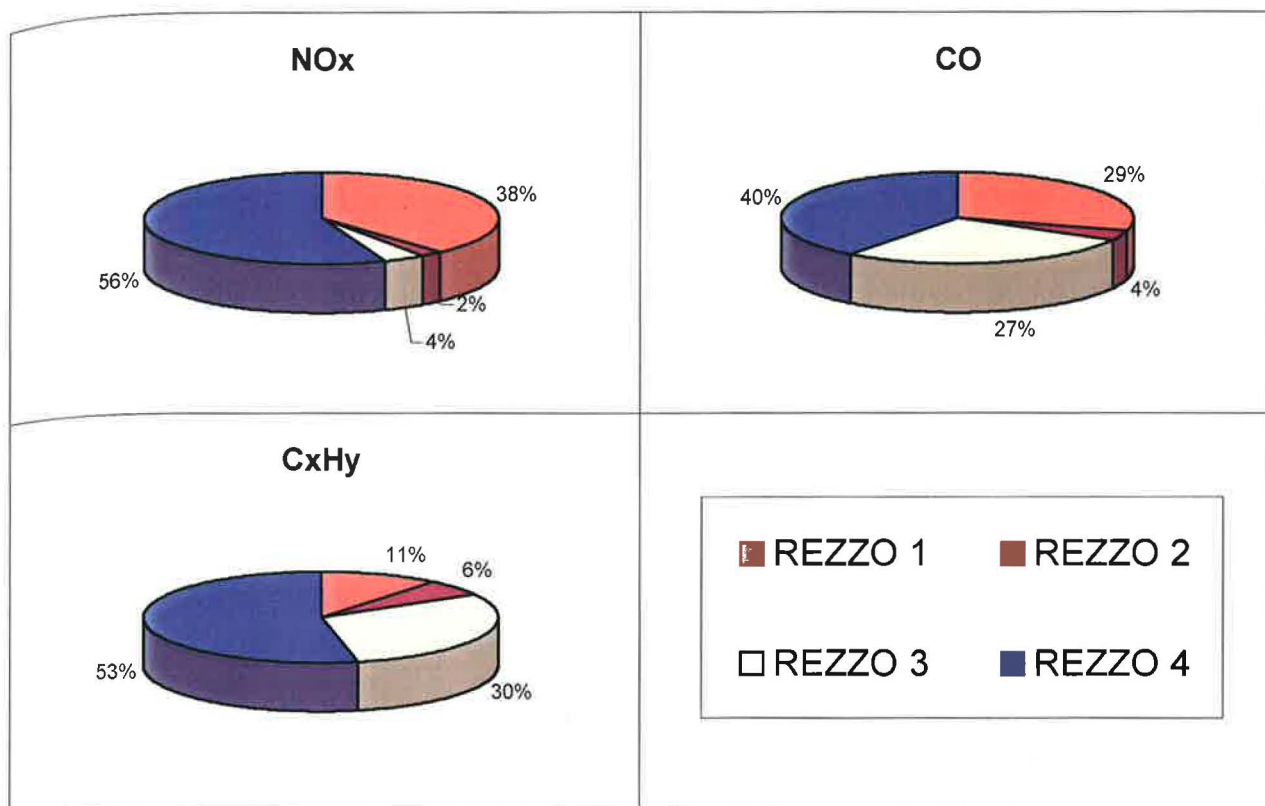
³ V souladu se zákonem č. 309/1991 Sb. ve znění zákona č. 211/1994 Sb. jsou zdroje znečišťování rozděleny do čtyř kategorií (REZZO – Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší)

REZZO 1 – velké zdroje (stacionární zdroje s výkonem 5 MW a vyšším)

REZZO 2 – střední zdroje (stacionární zdroje s výkonem v rozmezí 0,2 – 5 MW)

REZZO 3 – malé zdroje (lokální zdroje s výkonem pod 0,2 MW posuzované jako plošné)

REZZO 4 – mobilní zdroje (posuzované jako liniové zdroje)



1.2. Okamžité zdroje

Druhým typem zdrojů jsou zdroje s jednorázovým nebo krátkodobým únikem znečišťující látky do ovzduší. Tyto úniky jsou často důsledkem havárie na průmyslovém provozu. Nebezpečné jsou zejména havárie na chemických a nukleárních zařízeních. V těchto případech jsou emitovány velká množství látky v průběhu krátkého časového úseku. Dopad na životní prostředí je tedy jednorázový, ovšem důsledky mohou přetrvávat po řadu let. Zde je velmi důležité včasné varování eventuelně evakuace obyvatelstva ve směru šíření uvolněné látky. K tomuto úkolu jsou využívány havarijní systémy jednotlivých závodů v součinnosti s modely transportu a rozptylu znečištění .

1.2.1. Znečišťující látky

Při haváriích může být do ovzduší uvolněna široká škála znečišťujících látek od velmi toxických chemikálií produkovaných při dané výrobě, přes zplodiny hoření při požáru až po radioaktivní materiály.

1.2.1.1. Úniky z chemických zařízení

K úniku nebezpečné látky může dojít v podstatě na jakémkoliv provozu. Havárie menšího rozsahu provázejí např. dopravní nehody při převozu chemikálií, větší úniky z výrobních hal mohou ovlivnit široké okolí. Důležitá je zejména rychlá identifikace uniklé látky, její toxicity a rizikovosti a vyhodnocení směru transportu uvolněného materiálu.

1.2.1.2. *Radioaktivní látky*

Radioaktivní látky jsou do atmosféry opět emitovány i přirozenou cestou (rozpadové produkty radonu, ...), ale nebezpečné jsou úniky, které jsou důsledkem činnosti člověka (jaderné pokusy, emise z jaderných zařízení, ...). Nejvyšší radioaktivita v ovzduší byla pozorována na počátku šedesátých let. Po podepsání „Dohody velmocí o zákazu provádění pokusů s jadernými zbraněmi pod vodou, na zemi, v atmosféře a v kosmickém prostoru“ (Moskva 5.8.1963) nastal trvalý pokles umělé radioaktivity v ovzduší.

1.2.2. **Nejvýznamnější úniky s dopadem na větší území**

Úniky z chemických provoďů jsou spíše lokálního významu s krátkodobými efekty. Proto není dostupná jejich inventura. Za dobu využívání štěpných materiálů k válečným nebo mírovým účelům došlo k několika velmi vážným situacím, provázených únikem radioaktivity do okolí s důsledky na zdraví obyvatelstva. Zde uvádíme jen několik nejvýznamnějších:

1. První takovouto situací bylo dosud jediné nasazení nukleární zbraně v Hirošimě a Nagasaki na konci 2. světové války. Japonsko se s důsledky tohoto zásahu vyrovnává dodnes.
2. V roce 1957 došlo k požáru na grafitovém reaktoru produkujícím plutonium ve Windscale (dnes Sellafield) ve Velké Británii. Do ovzduší byl uvolněn zejména I-131. Riziková byla zejména konzumace mléka a mléčných výrobků.
3. V roce 1979 došlo k úniku radioaktivity na atomové elektrárně Three Mile Island (blok 2). Vlivem závady na ventilu sekundárního okruhu došlo k přehřátí reaktoru a k následnému úniku radioaktivity do okolí. Období, po které budou patrné důsledky této havárie bylo odhadnuto na 30 let.
4. K dosud nejzávažnější havárii došlo v roce 1986 na bloku 4 na jaderné elektrárně v Černobyli. Ke katastrofě došlo za součinnosti konstrukční závady a lidského faktoru. Okolí Černobyli je dodnes uzavřenou oblastí a důsledky na zdravotním stavu obyvatelstva budou doznívat ještě řadu let.

2. MODELOVÁNÍ ZNEČIŠTĚNÍ

2.1. Význam modelování rozptylu znečištění

Nejspolehlivějším nástrojem pro hodnocení imisní situace je kvalitní měření. To je ovšem poměrně nákladná záležitost, proto není možné měřit všude, kde by bylo třeba. Zde je potom otevřené pole pro modely rozptylu znečištění v ovzduší, které lze využít jako nástroj pro doplnění chybějících hodnot. Monitoring znečištění podává informaci o stávajícím stavu ale není schopen postihnout vývoj do budoucna. To umožňují modely na základě různých scénářů. Ve spojení s meteorologickým prognózním modelem mohou sloužit jako podklad pro předpověď výskytu smogových situací. Významnou roli mají i v případě chemické nebo radioaktivní havárie, kdy je možno modelu využít pro předpověď šíření oblaku znečištění a tím i včasného varování obyvatelstva na zasaženém území.

2.2. Modely transportu a rozptylu

2.2.1. Rozdělení modelů podle horizontálního dosahu

Jedním ze základních kritérií pro dělení modelů transportu a rozptylu znečištění v atmosféře je velikost výpočetní oblasti pro kterou je daný model určen.

tabulka 1 Rozdělení rozptylových modelů podle velikosti výpočetní oblasti

Označení	Rozměr	Popis (příklad)
lokální efekty (<i>near-field</i>)	do 1 km od zdroje	závětrné efekty za budovami
transport na krátké vzdálenosti (<i>short-range</i>)	do 10 km od zdroje	oblast největšího přízemního dopadu primárních znečišťujících látek emitovaných z vyvýšených zdrojů
regionální transport (<i>intermediate transport</i>)	10 – 100 km od zdroje	oblast kde začínají hrát roli chemické reakce znečišťujících látek
dálkový transport (<i>long-range</i>)	nad 100 km	oblast s velkorozměrovými meteorologickými efekty, nezanedbatelná role depozice a transformace
globální modely (<i>global</i>)	global	jevy zahrnující celou atmosféru (akumulace CO ₂)

2.2.2. Dělení modelů podle fyzikálního přístupu

Modely transportu a rozptylu znečištění lze obecně rozdělit na dvě základní kategorie podle použitého přístupu:

1. Eulerovské modely (souřadný systém je pevně spojený se zemským povrchem – vyšetřujeme změny koncentrace v pevně zvoleném bodě)
2. Lagrangeovské modely (souřadný systém sleduje individuální vzduchovou částici – sledujeme změny, ke kterým dochází na této částici)

Obě kategorie modelů mají své výhody i nevýhody, a liší se i oblasti typického použití jednotlivých kategorií. V některých případech je pro vylepšení chování modelu možno využít i kombinace obou přístupů.

2.2.2.1. Eulerovské modely

Eulerovské modely jsou založeny na řešení rovnice difúze a zákona zachování hmoty. Koncentrace je obecně funkcí polohy a času $c = c(x, y, z, t)$.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\bar{u} \cdot \nabla c + D \nabla^2 c + S \quad (1)$$

D je koeficient molekulární difúze,
 c je koncentrace,
 S reprezentuje zdrojový člen,
 \bar{u} je vektor rychlosti proudění.

Při výpočtu se předpokládá, že skutečný vektor proudění v atmosféře je možno rozepsat do dvou složek: složku průměrného (středovaného) proudění \bar{u} a složku reprezentující odchylky (fluktuační) u' . Tuto skutečnost je pak možno matematicky zapsat jako

$$\bar{u} = \bar{u} + u' \quad (2)$$

Základní rovnici lze, za využití předpokladu $u' = 0$, přepsat do tvaru

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\bar{u} \cdot \nabla c - \nabla \cdot c' u' + D \nabla^2 c + S \quad (3)$$

Střední rychlost proudění je poměrně dobře stanovitelná na základě meteorologických měření. Problémem zůstává určení nových veličin, které jsme získali výše naznačeným postupem $c' u'$. Flukuační změny vektoru proudění mohou být i stejného řádu jako střední rychlost proudění. Z této skutečnosti je zřejmá důležitost těchto složek při řešení rovnice. Stanovení těchto členů (problém uzávěru) je v praxi prováděn několika způsoby. Jedním z nejjednodušších je využití předpokladů tzv. K-teorie, kde

$$\overline{c' u'} = -K \nabla c \quad (4)$$

kde K představuje 3-dimenzionální koeficient turbulentní difúze. Pro jeho vyjádření je v literatuře možno nalézt řadu semiempirických metod. Jiným postupem je využití uzávěrů vyšších řádů, kdy při následných úpravách základních rovnic vyjadřujeme korelace druhého řádu. Současně ovšem získáváme korelace třetího řádu atd. Je tedy nutné tento proces někde ukončit a parametrizovat korelace n-tého řádu (uzávěr n-tého řádu).

Analytické řešení základní rovnice je možné pouze při zavedení řady zjednodušujících předpokladů. Jedním z často uvažovaných zjednodušení je předpoklad homogenity a izotropnosti koeficientu turbulentní difúze, konstantnosti pole proudění (jak v čase tak v prostoru) atd.

Použijeme-li rovnici bez těchto zjednodušení, je nutno využít numerických metod řešení rovnice difúze, ke kterému je možno přistupovat řadou technik (metoda konečných diferencí, spektrální metody ...).

Problematické u Eulerovských modelů je zejména stanovení počátečních podmínek emise, tj. rozptyl v subgridovém měřítku. Uvažujeme-li rovnoměrný rozptyl po celém čtverci, nadhodnocujeme tím, zvláště pro bodové zdroje, významně rozptyl. Řešením tohoto problému může být např. kombinace Lagrangeovského (inicializace zdroje) a Eulerovského přístupu.

Eulerovské modely jsou často používány pro hodnocení rozptylu znečištění především na menších oblastech, kde ve spojení s lokálním meteorologickým modelem jsou schopny popsat pole koncentrací i v relativně složitém terénu. V některých meteorologických službách jsou Eulerovské modely používány i pro řešení dálkového transportu znečištění (model MEDIA v Metéo-France).

2.2.2.2. Lagrangeovské modely

Lagrangeovský přístup je založen na sledování individuální částice při jejím transportu v ovzduší. Obecně je toto označení možno vztáhnout na celou škálu modelů, ve kterých je vlečka od zdroje rozdělena na jednotlivé elementy, jejichž transport a rozptyl je dále sledován.

Základní rovnice pro atmosférický rozptyl jedné znečišťující látky má tvar:

$$c(r, t) = \int \int p(r, t | r', t') \cdot S(r', t') dr' dt' \quad (5)$$

r je uvažovaná poloha

t je čas

$S(r', t')$ je zdrojový člen

$p(r, t | r', t')$ je hustota pravděpodobnosti, která vyjadřuje pravděpodobnost, že se částice z polohy r' , kterou zaujímá v čase t' přesune do bodu r v čase t .

Prostorová integrace je zde uvažována přes celou výpočetní oblast. Pro hustotu pravděpodobnosti platí

$$\int p(r, t | r', t') dr \leq 1 \quad (6)$$

V případě, že neuvažujeme žádné procesy odstraňování znečišťující látky z atmosféry, je rovnice (6) rovna 1, pokud jsou tyto procesy v modelu zahrnuty, může být integrál menší než 1.

Zdrojová funkce $S(r', t')$ je pro primární znečišťující látku větší než nula pouze v místě zdroje, pro sekundární znečišťující látky může být zdrojový člen nenulový obecně v každém bodě výpočetního prostoru.

V praxi je téměř nemožné vyhodnotit emisní historii členu $S(r', t')$ pro období $-\infty < t' \leq t$. Proto se výchozí rovnici (5) používá ve tvaru:

$$c(r, t) = \int p(r, t | r', t') \cdot c(r', t_0) dr' + \int_{t_0}^t \int p(r, t | r', t') \cdot S(r', t') dr' dt' \quad (7)$$

kde je do výpočtu zahrnován pouze příspěvek zdrojů za období $t_0 \leq t' \leq t$, zatímco první integrál načítá příspěvek zdroje před časem t_0 .

Klíčovým problémem zůstává vyhodnocení hustoty pravděpodobnosti p , která je pro nereaktivní a nedeponující příměsi pouze funkcí meteorologických podmínek. Při využití různých parametrizací pravděpodobnostní funkce lze odvodit Gaussovské rozložení, rovnice K-teorie atd.

Lagrangeovské modely mají řadu podtypů: Lagrangeovské box modely, Gaussovské modely, kdy vlečka je rozdělena na jednotlivé segmenty (segment plume model) dále puff modely a konečně částicové modely. Z uvedených se budeme podrobněji věnovat puff modelům.

Nevýhodou Lagrangeovských modelů je jejich velká náročnost na strojový čas a paměť počítače. Problematické je i zahrnutí komplexního chemizmu nutného zejména pro modelování fotochemických reakcí. Vhodné jsou proto zejména pro modelování šíření znečištění z několika málo zdrojů (havarijní systémy...).

2.2.2.3. Gaussovské modely

Gaussovské modely představují jeden z nejrozšířenějších typů modelů transportu a rozptylu znečištění v atmosféře. Jedná se v podstatě o speciální případ analytického řešení rovnice difúze se zavedením řady zjednodušujících předpokladů. Rovnice je řešena pro stacionární případ (meteorologie i emisní parametry) a v základním tvaru je schopna popsat rozptyl z bodového zdroje (tj. zdroje jehož horizontální rozptyl je mnohem menší ve srovnání se výpočetní vzdáleností). Výpočetní rovnice předpokládá, že osa x je položena ve směru proudění a pracujeme nad rovinným terénem. Výsledná výpočetní rovnice má potom tvar:

$$c = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_h \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta_{sr}}{\sigma_h}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z_s + h - z_r}{\sigma_z}\right)^2\right\} \quad (8)$$

- Q je emisní tok ze zdroje
- σ_h, σ_z představují horizontální, resp. vertikální rozptylový parametr
- Δ_{sr} je horizontální vzdálenost referenčního bodu od osy vlečky
- z_s je nadmořská výška zdroje
- z_r je nadmořská výška referenčního bodu
- h představuje efektivní výšku zdroje

$|\vec{u}|$ je rychlost proudění

Tento základní tvar Gaussovského modelu je v praxi modifikován řadou úprav, které rozšiřují možnost využití těchto modelů. Zavádí se např. různé korekce na zahrnutí terénu, příkladem je funkce θ v modelu SYMOS'97, která je jistou charakteristickou hodnotou průběhu terénu mezi referenčním bodem a zdrojem (viz. [6]). Další často využívanou úpravou je zavedení virtuálního zdroje pod úroveň terénu a ve vyšších hladinách, pomocí nichž jsou simulovány odrazy od zemského povrchu a od horní hladiny směšovací vrstvy. Parametry rozptylu σ_x a σ_z jsou v mnoha modelech uvažovány jako funkce času nebo vzdálenosti zdroj – referenční bod. V literatuře jsou dostupné i složitější parametrizace rozptylu znečišťujících látek v atmosféře. Parametry obecně závisí na stabilitě atmosféry. Pro praktické využití je zaváděna celá řada stabilitních klasifikací. Ve světě je nejčastěji využívána klasifikace Pasquill-Gifford, v České republice je široce využívána stabilitní klasifikace Bubník-Koldovský. Základní rovnice jsou vylepšovány zahrnutím depozičního a transformačního členu, eventuelně členu popisujícího radioaktivní rozpad.

Gaussovské modely nacházejí široké uplatnění zejména při rozhodovacích procesech spojených s výstavbou či rekonstrukcí zdrojů znečištění, při hodnocení různých scénářů, pro stanovování průměrných koncentrací za delší časové období. Tedy všude tam, kde nemáme k dispozici skutečné meteorologické pole (výhledové studie na několik let dopředu) nebo kde by výpočet na reálných datech byl trval neúměrně dlouho.

2.2.2.4. Puff modely

Základní výpočetní rovnice pro puff modely je obdobná rovnici uvedené pro Gaussovské modely.

$$\Delta c = \frac{\Delta M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_s - x_r}{\sigma_x}\right)^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{y_s - y_r}{\sigma_y}\right)^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{z_s - z_r}{\sigma_z}\right)^2\right\} \quad (9)$$

- ΔM je množství látky obsažené v daném oblaku
- σ_i jsou směrodatné odchylky
- x_s, y_s, z_s je poloha zdroje
- x_r, y_r, z_r je poloha referenčního bodu

Tato rovnice je ve většině případů doplněna odrazovým členem a popisem depozice a radioaktivního rozpadu. Výsledná koncentrace v daném čase je vypočtena jako suma všech příspěvků Δc od všech oblaků (puffů) na daném referenčním bodě. Pro popis rozptylových parametrů je možno v literatuře nalézt řadu semiempirických přístupů od nejjednodušších, kdy závisí pouze na době, která uplynula od emise daného oblaku, či na délce trajektorie, až po ty

nejkomplexnější zahrnující celou řadu meteorologických parametrů. Disperzní parametry σ_r a σ_j je možno většinou pokládat za stejné a společně je pak značit jako horizontální rozptyl σ_h .

Aby model lépe postihoval změny v poli proudění v prostoru i čase, mají některé modely vestavěny procedury, které umožňují rozdělení oblaků na několik menších v případě, kdy horizontální nebo vertikální rozměr přesáhne danou hodnotu (obvykle související s rozměrem výpočetního gridu). Tyto procedury umožňují, aby se puff pohyboval ve skutečném proudění. Kdyby nebylo toto dělení implementováno, okrajové části oblaku by se mohly nacházet ve zcela jiném proudění než střed, který je v modelu transportován.

2.3. Problémové okruhy dálkového transportu znečištění

V této práci se budeme zabývat především modelováním dálkového transportu znečištění, eventuelně rozptylem v regionálním měřítku, proto zde uvedeme některé problémy modelování dálkového transportu znečištění:

- časové měřítko při přenosu na velké vzdálenosti je příliš velké pro použití stacionární a homogenní meteorologie. Znečišťující látky jsou ovlivňovány v každém okamžiku a v každém místě jinými meteorologickými podmínkami, proto pouze dynamické nestacionární modely mohou dobře reprodukovat dálkový transport,
- v modelech je nutno uvažovat vliv depozice a chemické transformace znečišťující látky
- při použití eulerovských modelů nabývá na významu numerická chyba spojená s advekčním členem a to zvláště pro bodové zdroje
- vertikální difúze může být často zanedbána, je-li použit předpoklad rovnoměrného rozptýlení znečišťující látky v celé výšce směšovací vrstvy
- problematické je zohlednění transportu znečištění skrz inverzní vrstvu
- klíčové pro správnou činnost trajektoriového modelu je stanovení „správné“ trajektorie vzduchové částice, kdy malá odchylka na začátku může vyústit ve značnou chybu v konečné fázi výpočtu.

3. POPIS POUŽITÉHO MODELU

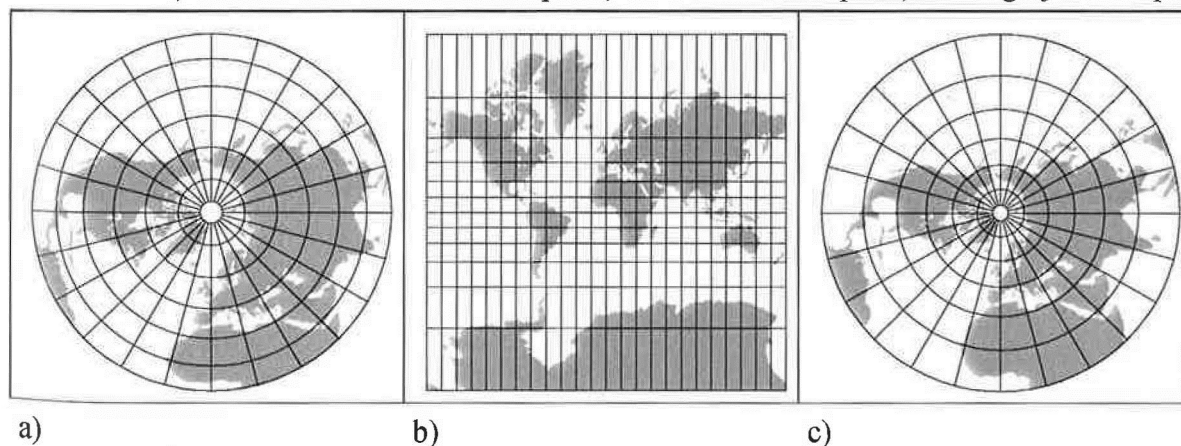
Pro výpočty byl v této práci použit model HYSPLIT 4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), který byl vyvinut v NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Jedná se o Lagrangeovský puff model, kombinovaný dohromady s částicovým přístupem. Tento model byl vybrán proto, že se ukazuje jako vhodný pro budoucí implementaci chemického a radioaktivního submodelu a operativní nasazení v rámci Českého hydrometeorologického ústavu. V této práci byla ověřována činnost celého systému a byly testovány parametrizace výpočtu výšky směšovací vrstvy a rozptylu.

3.1. Souřadný systém modelu

3.1.1. Horizontální projekce

Vstupní a výstupní informace o poloze zdrojů, resp. o vypočtených hodnotách jsou poskytovány v zeměpisných souřadnicích φ , λ . Meteorologická data mohou být uložena v kterémkoliv z podporovaných zobrazení (Lambertově azimutálním, Mercatorově nebo stereografickém). Model pak při výpočtech využívá stejné zobrazení, ve kterém byly uloženy vstupní meteorologické údaje. Model tak umožňuje používat data z různých zdrojů bez nutnosti horizontální interpolace a tím i ztráty části informace v datech obsažené.

obrázek 4 Mapy severní polokoule, resp. světa, v normální poloze pro podporovaná zobrazení: a) Lambertova azimutální mapa, b) Mercatorova mapa, c) stereografická mapa



V modelu je využita softwarová podpora CMAPF (Conformal MAP Function). Tato knihovna (dostupná v jazyku FORTRAN a C) vyvinutá v NOAA poskytuje možnost vzájemné konverze mezi zeměpisnými souřadnicemi φ a λ , Lambertovým azimutálním zobrazením, Mercatorovým zobrazením a stereografickým zobrazením. Implementovány jsou funkce umožňující převod jak skalárních veličin tak vektorů.

3.1.2. Vertikální souřadný systém

Modely transportu a rozptylu znečištění v ovzduší pracují s řadou vertikálních systémů. Nejjednodušší je systém využívající jako vertikální souřadnici výšku z . Jedná se o jednoduchou vertikální souřadnici, která ovšem s sebou přináší řadu problémů zvláště při modelování nad komplexním terénem. Sofistikovanější systémy potom využívají jako vertikální souřadnici tlak p . V současné době jsou nejčastěji používány souřadnice σ a η , které umožňují snazší zahrnutí vlivu orografie do výpočtu. σ -systém je obecně definován jako poměr tlaku nebo výšky v dané hladině ku zadané referenční (buď hodnoty na zemském povrchu nebo na horní hranici modelu). Hybridní η -systém, využívaný např. v ECMWF je definován tak, aby v nižších hladinách kopíroval zemský povrch a v nejvyšších hladinách se stal nezávislým na orografii. Takto definovaná souřadnice do značné míry koresponduje se skutečným chováním meteorologických veličin, které jsou ve spodní části atmosféry ovlivňovány zemským povrchem, zatímco v horních vrstvách atmosféry je pak vliv podkladu možno zanedbat.

Model HYSPLIT využívá jako vnitřní vertikální systém σ_z , který je založen na výšce nad terénem. Jedná se tedy o systém kopírující terénní překážky v celém vertikálním rozsahu. Jednotlivé hladiny jsou definovány vztahem:

$$\sigma_z = 1 - \frac{z}{z_{top}} \quad (10)$$

z je aktuální výška nad terénem
 z_{top} je výška horní hladiny modelu

Vertikální rozložení modelových hladin je v podstatě libovolné, ovšem s ohledem na význam procesů probíhajících v blízkosti zemského povrchu je vhodné používat vyšší rozlišení v blízkosti povrchu než ve volné atmosféře. Pro definici hladin byla využita kvadratická závislost. Nejnižší hladina je ve výšce 10 m, druhá v 75 m, třetí ve 200 m. Dvacátá hladina se pak nachází již 11,5 km (v této výšce je tloušťka jedné vrstvy cca. 1200 m).

3.2. Advekce oblaku

Pro výpočet rychlosti proudění v místě středu oblaku je použita, jak v čase tak v prostoru, lineární interpolace. Praktické zkušenosti ukazují, že její přesnost je ve většině případů dostačující a její výhodou, oproti vyspělejšími interpolačním technikám, je rychlost.

Vzhledem k tomu, že rozměr oblaku je vždy menší nebo roven kroku meteorologických dat (viz. kapitola 3.6.), je možno přesunovat oblak pomocí proudění stanoveného v jeho středu. Vlastní posun oblaku se provádí ve dvou krocích: nejprve je stanovena nová poloha za pomoci větru v původní pozici středu oblaku (11). V druhém kroku (12) je proveden výpočet konečné

pozice na základě průměrného proudění mezi původní polohou a pozicí vypočtenou v prvním kroku.

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + v(P, t) \cdot \Delta t \quad (11)$$

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0,5(v(P, t) + v(P', t + \Delta t)) \cdot \Delta t \quad (12)$$

Výpočet trajektorie daného oblaku je ukončen, pokud tento opustí výpočetní oblast. Délku aktivity jednotlivých oblaků je možno omezit vstupními parametry (maximální délka trajektorie...).

3.3. Stabilita

Stabilita atmosféry je jedním ze základních faktorů ovlivňujících velikost rozptylu jednotlivého oblaku. Model využívá pro hodnocení stability parametru z/L , kde L je Moninova a Obuchovova délka. Metoda výpočtu hodnoty z/L vychází z Richardsonova čísla pro vrstvu:

$$Ri_b = \frac{g \Delta \theta \Delta z}{\theta_{l_2} ((\Delta u)^2 + (\Delta v)^2)} \quad (13)$$

Δ označuje rozdíl mezi hladinami 1 a 2
 θ_{l_2} je průměrná potenciální teplota ve vrstvě

Stabilitní parametr z/L je stanoven na základě empirického vztahu, který na základě měření odvodili Abdela a McFarlane (1996).

$$\begin{aligned} z/L &= Ri_b \left(\frac{s^2}{t} - 0,5 \right) & Ri_b \leq 0 \\ z/L &= \frac{-t + 2s \beta Ri_b + (t^2 - 4s t \beta Ri_b + 4s^2 \beta Ri_b)^{1/2}}{2\beta(1 - \beta Ri_b)} & 0 \leq Ri_b < 0,08 \\ z/L &= (0,005 s + 41,2) Ri_b^2 + (1,18 s - 1,5 v - 1,37) Ri_b & 0,08 \leq Ri_b \end{aligned} \quad (14)$$

kde

$$s = \ln \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right), \quad t = \ln \left(\frac{z}{z_h} + 1 \right), \quad v = \ln \left(\frac{z_0}{z_h} \right) \quad (15)$$

z_0 parametr drsnosti (pro hybnost)
 z_h parametr drsnosti pro teplo ($z_0/z_h = 10$)
 β konstanta ($\beta=5$)

3.4. Frikční rychlost a teplota

Frikční rychlost a teplota jsou stanovovány za použití normalizovaných profilů pro teplo a hybnost (Φ_h, Φ_m).

$$u_* = \frac{k z_{st} \Delta u}{\Phi_m \Delta z} \quad (16)$$

$$T_* = \frac{k z_{sl} \Delta u}{\Phi_h \Delta z} \quad (17)$$

k je von Kármánova konstanta ($k \approx 0,4$)
 z_{sl} je výška přízemní vrstvy (obvykle druhá modelová hladina)

Normalizované profily jsou stanovovány na základě vztahů, které odvodili Beljaars a Holtslag (1991) pro stabilní podmínky ($0 \leq z/L \leq 10$).

$$\Phi_m = 1 + z/L (a + b \exp(-d z/L) \cdot (1 - d z/L + c)) \quad (18)$$

$$\Phi_h = \Pr \left(1 + z/L \left(a(1 + a b z/L)^{1/2} + b \exp(-d z/L) \cdot (1 - d z/L + c) \right) \right) \quad (19)$$

Pr je turbulentní Prandtlovo číslo,
 $a-d$ jsou konstanty ($a = 1$, $b = 2/3$, $c = 5$ a $d = 0,35$).

Pro labilní zvrstvení ($-2 \leq z/L \leq 0$) jsou použity vztahy odvozené Kaderem a Perepelkinem (1989).

$$\Phi_m = \left(\frac{1 + 0,625(z/L)^2}{1 - 7,5 z/L} \right)^{1/3} \quad (20)$$

$$\Phi_h = 0,64 \left(\frac{3 + 2,5 z/L}{1 - 10 z/L + 50(z/L)^2} \right)^{1/3} \quad (21)$$

3.5. Výška směšovací vrstvy

3.5.1. Metoda založená na vertikálním gradientu teploty

Ke stanovení výšky směšovací vrstvy je využito skutečnosti, že je často spojena s výskytem inverze. Předpokládá se proto, že tato výška je rovna hladině, ve které je potenciální teplota o dva stupně vyšší než potenciální teplota na zemi. Teplotní profil je analyzován odshora, aby se vyloučily nízké hladiny. Minimální výška byla stanovena na 250 m v průběhu celého dne. Vzhledem k dennímu chodu výšky směšovací vrstvy je tato hodnota během noci pravděpodobně nadhodnocena, ale poskytuje uspokojivé výsledky.

3.5.2. Odhad založený na Richardsonově čísle pro vrstvu

Výška směšovací vrstvy je definována jako hladina, kde Richardsonovo číslo pro vrstvu (13) dosáhne kritické hodnoty ($Ri_{bc} = 0,25$). Tato metoda poskytuje uspokojivé výsledky nad pevninou. Nad oceánem, v místech s vysokými rychlostmi proudění, dochází k jejímu nadhodnocení.

3.5.3. Modifikovaná metoda vertikálního teplotního gradientu

Postup uvedený v kapitole 3.5.1. by měl být používán pouze při labilním teplotním zvrstvení. Pro neutrální a stabilní teplotní zvrstvení byla proto modifikována vzorci (Koracin a Berkowicz, 1988)

$$H_{mix} = k \frac{\overline{u_* L}}{f} \quad \text{stabilní} \quad (22)$$

$$H_{mix} = 0.3 \frac{u_*}{f} \quad \text{izotermní} \quad (23)$$

3.5.4. Konstantní výška

Studie prováděné v rámci experimentu ETEX ukázaly, že v řadě případů je vhodné použít konstantní hodnotu výšky směšovací vrstvy, která dává lepší výsledky než složité metody výpočtu. Pro úplnost byl tedy otestován i tento přístup s $H_{mix} = 1000$ m.

3.6. Rozptyl znečištění

V puff modelech je zdroj simulován oblaky znečišťující látky vypouštěnými do ovzduší v každém časovém kroku po dobu činnosti zdroje. Jednotlivé oblaky, nesoucí odpovídající množství dané látky jsou transportovány v poli proudění. Vzhledem k tomu, že k pohybu dochází v turbulentním prostředí, narůstá vlivem rozptylu jejich velikost. Po nějakém čase mohou rozměry přesáhnou velikost gridu (ať už v horizontálním nebo vertikálním směru). V tomto případě již nelze pohyb oblaku spolehlivě popsat pouze posunem jeho středu (okrajové části se nachází v obecně jiných meteorologických podmínkách). Proto je v modelu implementován postup, při kterém dochází k dělení oblaku na několik částí tak, aby jejich rozměry byly menší než rozměry meteorologického gridu.

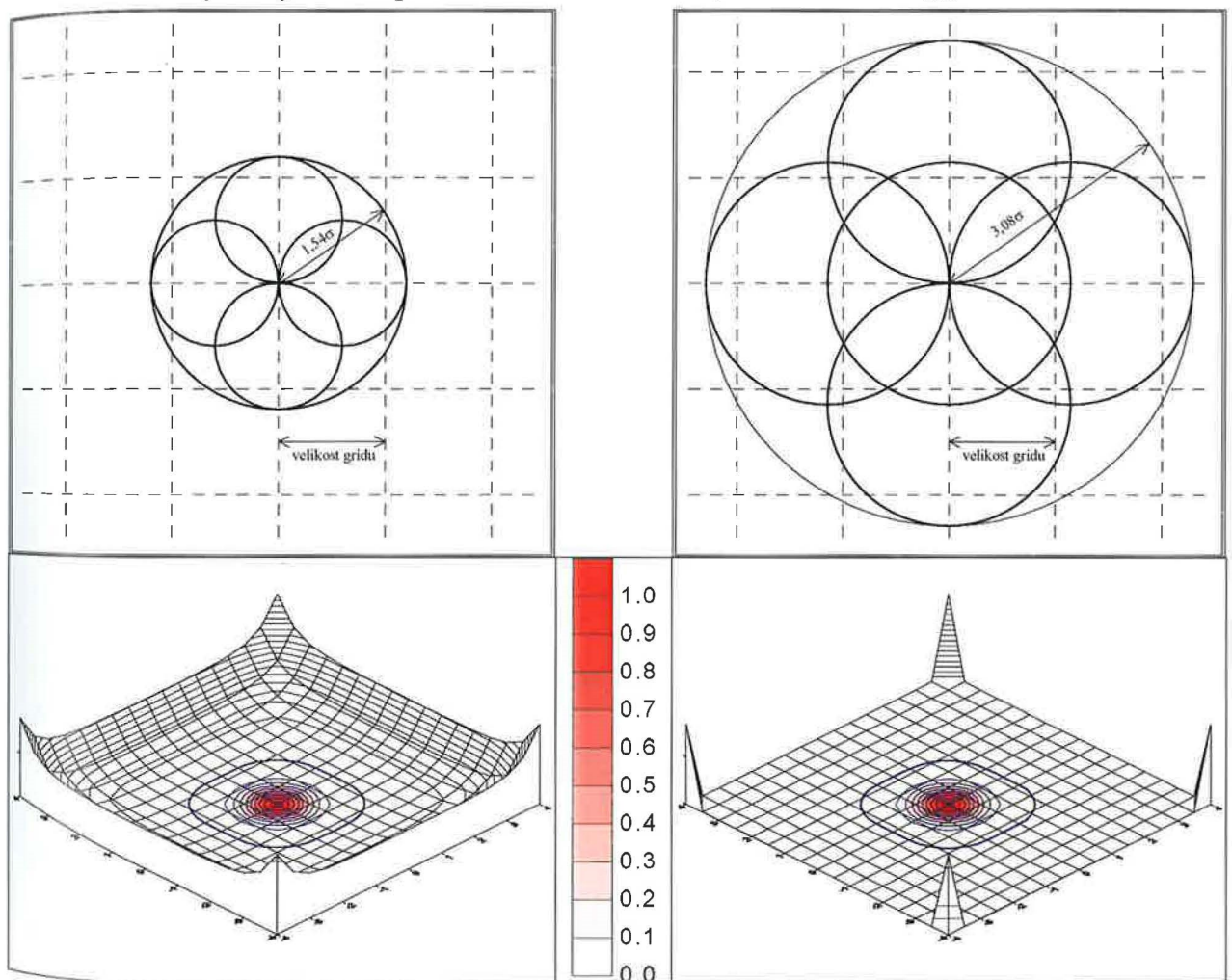
Při výpočtu pro delší časový úsek vzniká tímto způsobem velké množství samostatných oblaků. To klade velké nároky jak na výpočetní čas tak na paměť počítače. Proto model obsahuje postupy na eliminaci jejich počtu. Důvodem zániku je buď sloučení dvou místně i historicky blízkých oblaků nebo překročení volitelných kritérií pro ukončení jejich aktivity (např. stáří oblaku).

3.6.1. Štěpení oblaků

Jak již bylo zmíněno výše, v průběhu výpočtu dochází k nárůstu jednotlivých oblaků, které za nějakou dobu přesáhnou krok meteorologických dat (v horizontálním nebo vertikálním směru). V takovém případě je nutno oblak rozdělit na několik menších částí. Jednotlivé oblaky jsou považovány za válce s poloměrem $1,54\sigma_h$ a výškou $2 \cdot (1,54\sigma_z)$.

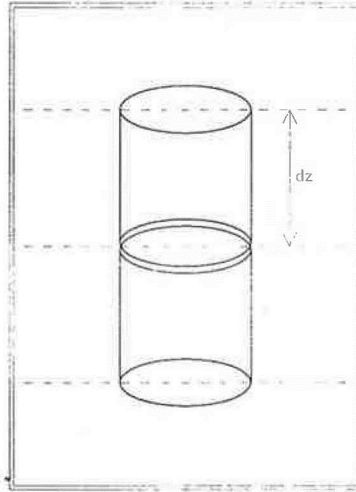
V případě, že dojde k překročení přípustné velikosti oblaku v horizontálním směru, dochází k jeho rozdělení standardně na čtyři samostatné části, z nichž každá obsahuje 25% původní hmoty. V případě extrémně velkého oblaku je tento dělen na pět částí, přičemž střední obsahuje 60% hmoty a ostatní čtyři, při okrajích původního oblaku, pouze 10% původní hmoty. Obr. ukazuje názorně princip štěpení oblaků. Současně je zde také zobrazena změna pozorovatelná v celkové koncentraci. K větším odchylkám dochází až ve větších vzdálenostech od oblaku, kde jsou hodnoty příspěvku oblaku k celkové koncentraci v podstatě zanedbatelné.

obrázek 5 Dělení puffů na 4 resp. na 5 částí (nahore), dole – plocha ukazuje podíl výsledné koncentrace od nových puffů a koncentrace působené původním oblakem, červené izoplochy ukazují úroveň koncentrace od daného puffu (c/c_{max}), modrá čára vymezuje oblast poklesu koncentrace na 0,001 vzhledem k c_{max} .



Ke štěpení oblaku ve vertikálním směru dochází za obdobné situace jako v případě horizontálního dělení. Oblak se dělí na n samostatných částí za předpokladu, že jeho vertikální rozměr přesahuje přes více než dvě vrstvy, (n je počet modelových vrstev obsažených uvnitř oblaku). Střed jednotlivých částí je umístěn vždy do středu odpovídající vrstvy.

obrázek 6 Vertikální štěpení oblaku



3.6.2. Rozptyl v subgridovém měřítku

Pro stanovení optimálního postupu výpočtu rozptylu v subgridovém měřítku bylo otestováno několik metod stanovení rozptylových parametrů.

3.6.2.1. Metoda použitá v původním modelu

Za předpokladu, že rozměr oblaku je menší než velikost gridu, je možno nárůst velikosti oblaku zapsat vztahem:

$$\frac{d\sigma_z^2}{dt} = 2 \sigma_w^2 T_L \quad (24)$$

a v horizontálním směru

$$\frac{d\sigma_h^2}{dt} = 2 \sigma_u^2 \quad (25)$$

směrodatné odchylky turbulentní rychlosti σ_z a σ_h jsou stanoveny z vertikální a horizontální diffusivity

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{K_i}{T_{Li}}}, \quad i = z, h \quad (26)$$

T_{Li} je Lagrangeovské časové měřítko

Koeficient vertikální difúze se stanovuje podle Beljaarse a Bettse (1993)

$$K_z = -C u_* T_* \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{-1} \quad (27)$$

kde $C = 0,4$. Horizontální koeficient turbulentní difúze je počítán z deformace proudění (Deardorff, 1973)

$$K_h = \frac{(c X)^2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (28)$$

X je rozměr gridu v horizontálním směru
 c konstanta ($c = 0,14$)

3.6.2.2. Parametrizace založená na Moninově a Obuchovově teorii

Tato parametrizace je produktem Minnesotského experimentu v roce 1973 (Hanna, 1981). Je použitelná pro časové kroky od 10 do 30 minut. Jako stabilitní parametr využívá Moninovu a Obuchovovu délku. kdy stabilitní situace je pro $0 < L < 9999$, neutrální pro $|L| \geq 9999$ a konečně labilní situace je pro $-9999 < L < 0$. Nárůst rozptylových parametrů je v tomto případě definován vztahy

$$\Delta\sigma_h = \frac{\sigma_u \Delta t}{\sqrt{1 + 0.5 \frac{t}{T_{Lh}}}} \quad (29)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{\sigma_w \Delta t}{\sqrt{1 + 0.5 \frac{t}{T_{Lz}}}} \quad (30)$$

je stáří oblaku

Horizontální směrodatná odchylka fluktuací rychlosti se potom počítá

$$\sigma_u = 1,3 u_* \left(1 - \frac{z}{H_{mix}} \right) \quad \text{stabilní} \quad (31)$$

$$\sigma_u = 1,3 u_* \exp\left(-2f \frac{z}{u_*}\right) \quad \text{neutrální} \quad (32)$$

$$\sigma_u = u_* \left(12 + 0,5 \frac{H_{mix}}{|L|} \right) \quad \text{labilní} \quad (33)$$

f je Coriolisův parametr ($f = 2\Omega \sin(\varphi)$)
 z je výška nad terénem
 u_* frikční rychlost
 H_{mix} výška směšovací vrstvy

Vertikální směrodatná odchylka je potom dána vztahy

$$\sigma_w = \max\left(1.3 u_* \left(1 - \frac{z}{H_{mix}} \right), 0.13 u_* \right) \quad \text{stabilní} \quad (34)$$

$$\sigma_w = 1.3 u_* \exp\left(-2f \frac{z}{u_*}\right) \quad \text{neutrální} \quad (35)$$

$$\sigma_w = 0.96 w_* \left(3 \frac{z}{H_{mix}} - \frac{L}{H_{mix}} \right)^{1.3} \quad \text{labilní} \quad 0 \leq \frac{z}{H_{mix}} < 0.03 \quad (36)$$

$$\sigma_w = \min \left(\sigma_z, 0.763 w_* \left(\frac{z}{H_{mix}} \right)^{0.175} \right) \quad \text{labilní} \quad 0.03 \leq \frac{z}{H_{mix}} < 0.4 \quad (37)$$

$$\sigma_w = 0.722 w_* \left(1 - \frac{z}{H_{mix}} \right)^{0.207} \quad \text{labilní} \quad 0.4 \leq \frac{z}{H_{mix}} < 0.96 \quad (38)$$

$$\sigma_w = 0.37 w_* \quad \text{labilní} \quad 0.96 \leq \frac{z}{H_{mix}} < 1 \quad (39)$$

3.6.2.3. Metodika SYMOS'97

Pro úplnost byly testovány i rozptylové parametry použité v metodice SYMOS'97. Jedná se o jednoduché exponenciální závislosti, kde jakožto stabilitní parametr je používán vertikální teplotní gradient.

$$\sigma_i = a_i x^{b_i} \quad i = h, z \quad (40)$$

a_i, b_i jsou konstanty, jejichž hodnoty jsou uvedeny v [6].
 x je délka trajektorie

3.7. Depozice

Depozice je proces probíhající v atmosféře, při kterém jsou z ovzduší odstraňovány znečišťující látky interakcí se zemským povrchem nebo s vodními kapkami, přítomnými ve vzduchu. Jedná se tedy o samočistící atmosférický proces, jehož důsledkem je úbytek množství dané látky ve vzduchu a naopak její kumulace na zemském povrchu, resp. ve vodě. Podle interagující materie dělíme depozici na suchou a mokrou.

Význam depoziční procesů roste s narůstající délkou transportu znečišťující látky v ovzduší. Zatímco v modelech na krátké vzdálenosti je možno u většiny látek depozici zanedbat, při dálkovém transportu kvalita parametrizací depozičních procesů významně ovlivňuje vypočtené hodnoty. Pro řadu materiálů (např. radioaktivní látky) je přitom důležité i stanovení množství deponované látky, protože tyto mohou zásadně ovlivňovat kvalitu životního prostředí a životní podmínky člověka, flóry i fauny.

V modelech dálkového transportu znečišťujících látek v ovzduší je vliv depozičních procesů obvykle zohledňován v každém časovém kroku výpočtu. Depozice látky je obvykle parametrizována exponenciální funkcí:

$$D = M \left(1 - \exp \left(- \Delta t (\beta_d + \beta_{wg} + \beta_{wi} + \beta_{wb}) \right) \right) \quad (41)$$

M je množství dané znečišťující látky obsažené v oblaku
 Δt je časový krok modelu,
 β_d je časová konstanta suché depozice

β_{wg}	je časová konstanta mokré depozice plynů
β_{wi}	je časová konstanta mokré depozice částic v oblačné vrstvě
β_{wb}	je časová konstanta mokré depozice částic v podoblačné vrstvě

3.7.1. Suchá depozice

Suchá depozice je atmosférický proces, při kterém dochází k zachycení polutantu na zemském povrchu, vegetaci nebo vodní hladině. U plynů závisí velikost suché depozice zejména na možnosti vzájemné interakce daného polutantu se zemským povrchem.

Časovou konstantu suché depozice β_d můžeme vyjádřit za pomoci depoziční rychlosti vztahem

$$\beta_d = \frac{v_d}{\Delta z_p} \quad (42)$$

Δz_p	je tloušťka vrstvy obsahující znečišťující látku
v_d	rychlost suché depozice

3.7.1.1. Depoziční rychlost

Nejjednodušší způsobem modelové parametrizace suché depozice využívá zadané depoziční rychlosti v_d , která je definována jako poměr mezi depozičním tokem F_d s rozměrem $[\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ a koncentrací daného polutantu v blízkosti zemského povrchu c $[\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$.

$$v_d = \frac{F_d}{c} \quad (43)$$

Depoziční rychlost není skutečnou rychlostí, ale jedná se o jakousi efektivní rychlost depozice (rozměrově v_d koresponduje s rychlostí $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$). Velikost depoziční rychlosti obecně závisí na typu znečišťující látky a na vlastnostech zemského povrchu. Dále ji mohou ovlivňovat různé meteorologické faktory.

3.7.1.2. Resistance

Poněkud jiný přístup k modelování depozičních procesů navrhl v roce 1978 Garland a dále rozvinul Hicks (1986). Depoziční rychlost je vyjádřena jako inverzní hodnota sumy rezistencí jednotlivých částí atmosféry.

$$v_d = \left(R_a + R_b + R_c + R_a R_b v_g \right)^{-1} + v_g \quad (44)$$

R_a	je rezistence atmosféry
R_b	je rezistence kvazilaminární podvrstvy
R_c	je rezistence vegetace
v_g	je rychlost gravitačního usazování pro částice

Rezistence závisí na meteorologických podmínkách a vlastnostech povrchu.

Atmosférická rezistence R_a vyjadřuje omezující úlohu atmosférické turbulence a je možno ji vyjádřit vztahem (Wesely a Hicks, 1977)

$$R_a = \frac{\text{Pr}}{k \cdot u_*} \left(\ln \frac{z_s}{z_0} - \psi_c \right) \quad (45)$$

z_s je výška referenční hladiny,
 z_0 je parametr drsnosti povrchu,
 k je von Karmanova konstanta ($\approx 0,4$),
 u_* je frikční rychlost,
 ψ_c je korekční člen na stabilitu.

přítom se předpokládá, že přenos polutantu v atmosféře je obdobný jako transport tepla. Potom je tedy možno považovat $\psi_c = \psi_h$.

Rezistence kvazilaminární podvrstvy (někdy též nazývané depoziční vrstva) vyjadřuje vliv tenké vrstvy těsně u zemského povrchu, charakterizované nesouvislou turbulencí. Pro plynné látky je rezistence kvazilaminární podvrstvy parametrizována

$$R_b = \text{Pr} \frac{d_1}{k u_*} S_c^{d_2} \quad (46)$$

d_1 jsou konstanty ($d_1 = 2, d_2 = 2/3$)
 S_c Schmidtovo číslo

Pro částice je použito obdobné vyjádření doplněné o člen charakterizující účinnost záchytu částic

$$R_b = \text{Pr} \left(\left(\frac{d_1}{k u_*} S_c^{d_2} \right)^{-1} + u_* \left(\frac{S_i}{S_i + p} \right)^q \right)^{-1} \quad (47)$$

p, q jsou výpočetní konstanty ($p = 0,8, q = 2$)
 S_i je Stokesovo číslo

Stokesovo číslo je počítáno ze vzorce

$$S_i = \frac{2 \nu_g u_*}{\ell_* g C_c} \quad (48)$$

kde ℓ_* je délkové měřítko laminární podvrstvy a C_c je Cunninghamův korekční člen pro částice (viz. obr. 7).

$$\ell_* = \frac{\nu}{u_*} \quad (49)$$

$$C_c = 1 + 2 \frac{\Lambda}{d} \left(1,26 + 0,4 \exp \left(-1,1 \frac{d}{2 \Lambda} \right) \right) \quad (50)$$

Λ je střední volná dráha molekul
 d je průměr uvažované částice
 ν je kinematičká viskozita

Rezistence vegetace závisí na rostlinném pokryvu terénu a na vlastnostech zemského povrchu. (Zemský povrch je v některých případech hodnocen samostatně.) Pro řadu polutantů představuje hlavní oblast depozice. Vzhledem k tomu, že tato rezistence představuje záchyt plynných látek na stomatech rostlin, je pro částice rovna nule. Wesely ji stanovuje podle vztahu

$$R_c = \left(\frac{1}{R_s + R_m} + \frac{1}{R_{lu}} + \frac{1}{R_{dc} + R_{cl}} + \frac{1}{R_{ac} + R_{gs}} \right)^{-1} \quad (51)$$

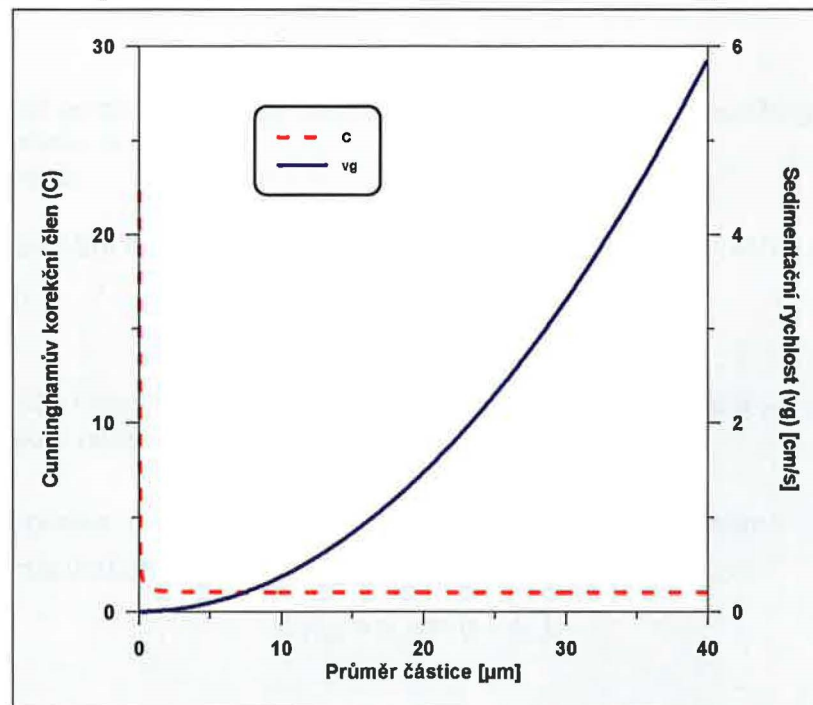
R_s představuje rezistenci stomat
 R_m je rezistence mezofylu
 R_{lu} rezistence povrchu listů v horní části vegetační vrstvy
 R_{dc} transport plynů vlivem konvekce
 R_{cl} rezistence povrchů v dolní části vegetační vrstvy
 R_{ac} faktor výšky a hustoty vegetační vrstvy
 R_{gs} rezistence zemského povrchu

Jednotlivé rezistence ve vztahu (50) jsou vyjadřovány jako funkce typu zemského povrchu, ročního období, difuzivity, teploty, Henryho konstanty a dalších parametrů charakterizujících vlastnosti polutantu.

3.7.1.3. Gravitační usazování

Rychlost sedimentace je funkcí velikosti částice, jejího průřezu a hustoty.

obrázek 7 Závislost depoziční rychlosti a Cunninghamova korekčního členu pro malé částice na průměru prachových částic (při normálních podmínkách)



Pro přibližně sférické částice se využívá modifikovaný Stokesův vztah:

$$v_s = \frac{d^2 g (\rho_p - \rho_a) C_c}{18 \mu \alpha} \quad (52)$$

- d je průměr částice.
 ρ_p hustota částice,
 ρ_a je hustota vzduchu,
 μ je dynamická viskozita vzduchu ($\mu = 0.01789 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
 α je parametr zohledňující průřez částice ($\alpha \in \{1, 2\}$)

3.7.2. Mokrý depozice

Mokrý depozice představuje proces, při kterém polutant interaguje s vodními kapkami přítomnými v atmosféře. V zásadě je možno rozlišit dva procesy: zachytávání v oblačné vrstvě (vypršení – rain-out) a vychytávání znečišťujících příměsí padajícími kapkami (vymytí – wash-out). Při vypršení tedy dochází k odstraňování znečištění, které bylo přineseno spolu s oblačnou vrstvou, při vymývání jsou odstraňovány znečišťující látky z podoblačné vrstvy, které mohou být i místního původu (při výškové advekci). Narozdíl od suché depozice, která je jevem odehrávajícím se v blízkosti zemského povrchu, mokrý depozice zasahuje celou podoblačnou vrstvu včetně oblaků.

Rychlost mokré depozice pro odstraňování pevných znečišťujících látek z oblačné vrstvy je definována jako

$$v_{wp} = S P \quad (53)$$

- S odstraňovací poměr (scavenging ratio) definovaný jako poměr koncentrace polutantu ve vodě ku jeho koncentraci ve vzduchu
 P intenzita srážek

Časová konstanta mokré depozice částic uvnitř oblaku je pak možno vyjádřit jako

$$\beta_{wt} = \frac{F^t F_b v_{wp}}{\Delta z_p} \quad (54)$$

- F^t, F_b představují část vrstvy obsahující polutant, která se nachází pod vrcholkem oblačné vrstvy, resp. nad její spodní základnou

Mokrý depozice v podoblačné vrstvě je považovaná za konstantní a závisí pouze na velikosti části vertikálního rozměru puffu obsaženého v podoblačné vrstvě

$$\beta_{wb} = 5 \cdot 10^{-5} (1 - F_b) \quad (55)$$

Velikost mokré depozice plynů závisí na jejich rozpustnosti ve vodě a pro inertní nereagující látky je funkcí Henryho konstanty (poměr rovnovážné koncentrace polutantu ve vodě ku koncentraci ve vzduchu).

$$v_{wg} = H R T P \quad (56)$$

H je Henryho konstanta
 R je univerzální plynová konstanta
 T je teplota

Časová konstanta mokré depozice pro plyny je pak vyjádřena vztahem

$$\beta_{wg} = \frac{F' v_{wg}}{\Delta z_p} \quad (57)$$

3.8. Radioaktivita

Radioaktivní rozpad je v modelu implementován pouze přes hodnotu poločasu rozpadu dané znečišťující látky. Nejsou zde tedy uvažovány žádné štěpné produkty. Množství látky, které zůstane v oblaku je potom, analogicky k rovnici (41), stanoveno

$$M_2 = M_1 \exp(-\beta_r \Delta t) \quad (58)$$

kde časová konstanta radioaktivního rozpadu je stanovena jako

$$\beta_r = \frac{\ln(2)}{T_r} \quad (59)$$

T_r je poločas rozpadu dané znečišťující látky

4. CHARAKTERISTIKY TERÉNU

4.1. Terén

Model nevyžaduje na vstupu nadmořské výšky terénu. Vzhledem k tomu, že meteorologická data, použitá při výpočtu ve většině případů pochází z meteorologických prognózních modelů pracujících na nějaké orografii, je vhodné, aby stejnou orografií používal i rozptylový model. Proto je orografie použita při výpočtu stanovována z hodnot nejnižších modelových hladin.

Nadmořská výška terénu je v případě potřeby stanovována interpolací mezi spodními modelovými hladinami (padne-li terén mezi ně) nebo je počítána ze stavové rovnice

$$z_g = z_1 - \frac{R_d T_{01}}{g} \ln \frac{p_0}{p_1} \quad (60)$$

R_d je plynová konstanta pro suchý vzduch
 T_{01} je průměrná teplota mezi dvěma nejnižšími modelovými hladinami
 p_1 jsou hodnoty tlaku na zemi, resp. v první modelové hladině
 g je gravitační zrychlení

4.2. Pokryv terénu

Součástí modelu je poměrně hrubá síť definovaných typů pokryvu terénu po celém světě s rozlišením 1° . Principiálně je možno použít i podrobnější datový soubor. Vzhledem k problémům se získáním a zpracováním takového množství dat se nepodařilo dokončit tvorbu tohoto souboru tak, aby mohla být použita při výpočtech.

4.3. Parametr drsnosti

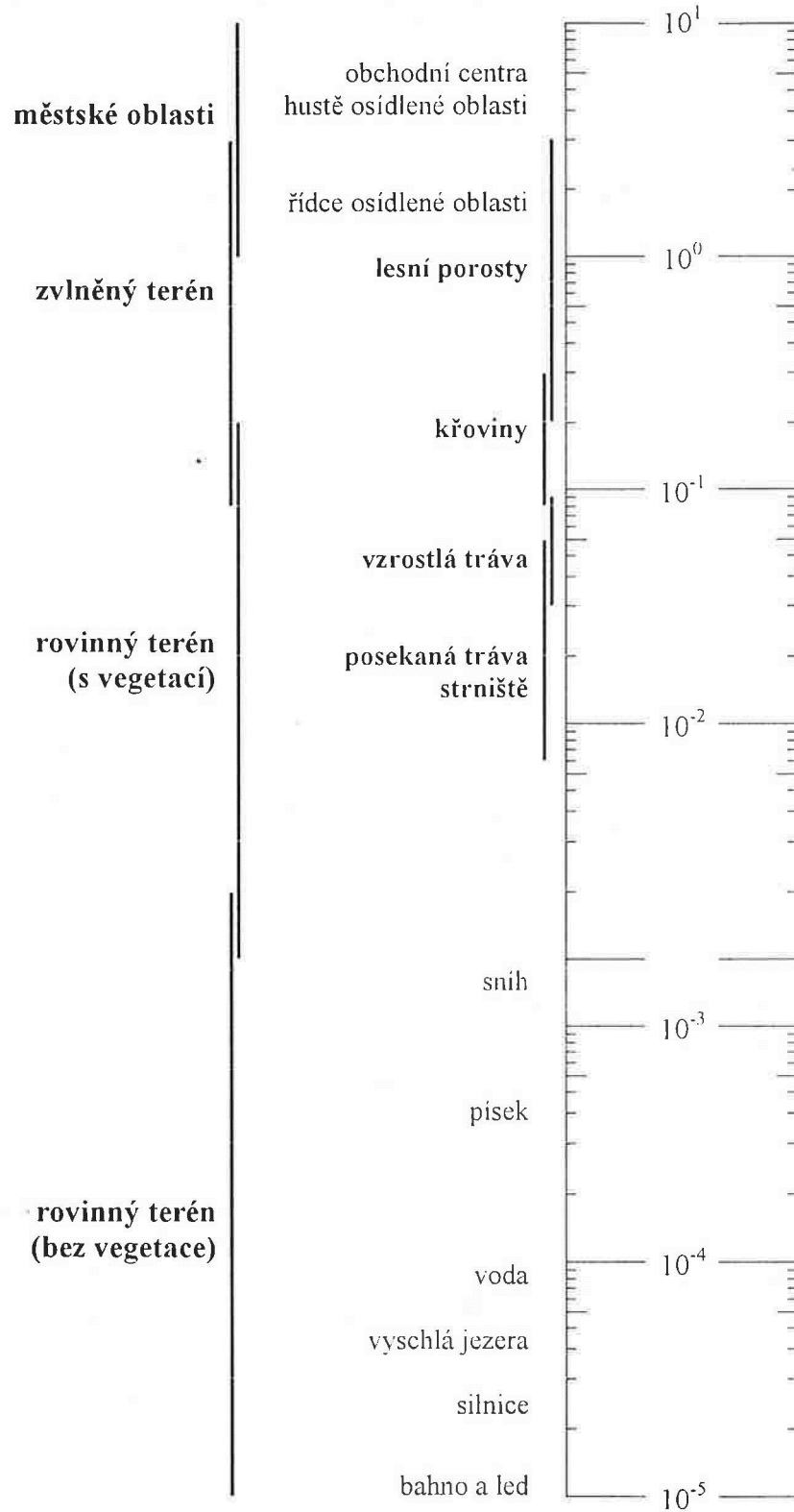
Parametr drsnosti je možno interpretovat jako efektivní výšku terénních nerovností, event. vegetace, na zemském povrchu. Jeho velikost je tedy úzce spjata s typem terénu. Následující obrázek uvádí orientační hodnoty parametru drsnosti pro různé povrchy.

Velikost parametru drsnosti lze vyhodnotit např. z měření vertikálního profilu rychlosti větru při indiferentním zvrstvení, za využití logaritmického profilu větru

$$v(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (61)$$

obrázek 8 Velikost parametru drsnosti pro různé povrchy

obrázek 8 Velikost parametru drsnosti pro různé povrchy



5. STATISTICKÉ METODY HODNOCENÍ MODELU

Pro hodnocení modelů je obecně možno využít řadu statistických metod. Jejich výběr by měl vycházet z cíle, ke kterému jsou modely určeny. Modely dálkového transportu znečištění, využívané v případě průmyslových havárií, by měly poskytnout spolehlivou informaci o směru šíření oblaku znečištění, dále o času příchodu oblaku nad dané území a konečně i nejvyšší koncentrace, které budou na daném území zaznamenány.

5.1. Rozptylový diagram

Rozptylový diagram poskytuje velmi dobrý informativní pohled na celkovou shodu mezi danou modelovou hodnotou a odpovídající měřenou. Touto metodou je možno vykreslit celou řadu veličin. V této studii byly hodnoceny následující hodnoty:

1. celková dávka D_T zaznamenaná na dané lokalitě, stanovená podle vzathu

$$D_T = \sum c_i (t_i - t_{i-1}) \quad (62)$$

c_i je koncentrace na dané stanici v čase i
 t_i čas

2. maximální koncentrace na jednotlivých měřicích stanicích
3. doba příchodu oblaku t_0 nad měřicí stanicí

$$t_0 = \min(t_i) \quad \text{pro } c_i \geq c_0 \quad (63)$$

4. doba příchodu maximální koncentrace t_{max0} na měřicí stanici

$$t_{max0} = t_i \quad \text{pro } c_i = \max(c_i) \quad (64)$$

5. doba trvání koncentrace vyšší než zadaná hladina t_d (je vhodné použít hodnotu významně odlišnou od pozadové – byla zvolena hodnota $c_0 = 0.05 \text{ ng.m}^{-3}$)

$$t_d = \sum (t_i - t_{i-1}) \quad \text{pro } c_i \geq c_0 \quad (65)$$

Korelační koeficient

Korelačního koeficient r je definován jako kovariance mezi dvěma sadami odchylek od středních hodnot, dělená jejich standardními odchylkami.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}) \cdot (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (66)$$

M jsou vypočtené hodnoty
 O jsou měřené hodnoty

Pro test významnosti korelačního koeficientu přijmeme jako výchozí hypotézu, že sady měření a dat jsou na sobě nezávislé ($r = 0$). Zamítnutí (nebo potvrzení) této hypotézy se provádí

porovnáním parametru t (Spiegel, 1992) s kritickou hodnotou Studentova rozložení s $n-2$ stupni volnosti :

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (67)$$

5.3. Vychýlení

Vychýlení se používá k testu, zda model nadhodnocuje nebo podhodnocuje

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i) = M - \bar{O} \quad (68)$$

V případě kladných hodnot model systematicky nadhodnocuje, v případě záporných podhodnocuje vzhledem k měření. Interval spolehlivosti lze stanovit jako

$$B_{ci} = \pm t_{\alpha} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i - BIAS)^2} \quad (69)$$

t_{α} koeficient spolehlivosti stanovený ze Studentova rozdělení $t_{\alpha} = 1.96; 2.58$ pro úroveň spolehlivosti 95%, resp. 99%

Hladina spolehlivosti 95% znamená, že s 95% pravděpodobností bude modelová hodnota ležet uvnitř intervalu spolehlivosti $BIAS \pm B_{ci}$.

5.4. Normalizovaná střední kvadratická odchylka

Normalizovaná střední kvadratická odchylka vyjadřuje celkovou odchylku modelu a měření

$$NMSE = \frac{1}{nM\bar{O}} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2 \quad (70)$$

Pokud je NMSE malá, je shoda modelu a měření dobrá.

5.5. Procentuální shoda (Figure of merit)

Procentuální shoda je definována jako

$$FM = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \min(M_i, O_i)}{\sum_{i=1}^n \max(M_i, O_i)} \quad (71)$$

Tato hodnota vyjadřuje míru překryvu mezi modelovými a pozorovanými hodnotami. Pokud je rovna 100%, je shoda absolutní, je-li 0% jsou sady dat rozdílné.

6. EXPERIMENT ETEX

6.1. Pozadí experimentu

Experiment ETEX (European Tracer Experiment) následoval časově po studii ATMES (viz. kapitola 7). Ve studii ATMES (Černobylská havárie) zůstávala problematickou zejména přesnost informací o velikosti úniku radioaktivního materiálu a stejně tak i o imisních hodnotách. Jejich spolehlivost je v mnoha případech diskutabilní. Proto byl proveden experiment ETEX, který měl za dobře definovaných podmínek umožnit verifikaci modelů dálkového transportu znečištění v ovzduší. Experiment byl společným projektem WMO (World Meteorological Organisation), IAEA (International Atomic Energy Agency) a EC (European Commission). Experiment byl řízen z JRC (Joint Research Centre) v italské Ispře. Experiment byl z hlediska modelování rozdělen do dvou kroků:

1. **Modelování v reálném čase**, které probíhalo ve zúčastněných institucích ihned po vypuštění stopovací látky do ovzduší. Předpověď jejího rozptylu na 60 hodin byla zasílána do centra v průběhu 6-ti hodin od zahájení experimentu.
2. **Následné podrobnější zpracování** transportu a rozptylu stopovací látky v ovzduší (studie typu ATMES).

Aby mohl experiment být úspěšný, vyžadoval širokou mezinárodní spolupráci. Do modelového zpracování se zapojilo celkem 24 organizací (s 28 modely). Po celé Evropě byla rozmístěna měřicí zařízení. Celkem jich bylo více než 150, umístěných většinou na profesionálních meteorologických stanicích.

V průběhu konce roku 1993 a začátku roku 1994 byly provedeny 3 pokusné simulace, kdy byly testovány komunikační linky mezi centrem a jednotlivými institucemi, schopnost jednotlivých organizací reagovat na vyhlášení experimentu, bylo ověřováno umístění měřicích

tabulka 2 Emisní údaje pro experiment ETEX

	1. experiment	2. experiment
Počátek úniku	23.10.1994 16:00 UTC	14.11.1994 15:00 UTC
Délka úniku	12 h	11,45 h
Poloha úniku	Monterfil (2°00'30''W, 48°03'30''N)	
Výška emise nad terénem	8 m	8 m
Emisní tok	7.95 g.s ⁻¹	11.58 g.s ⁻¹
Teplota	84°C	84°C
Výstupní rychlost	45 m.s ⁻¹	45 m.s ⁻¹
Stopovaná látka	PMCH	PMCH
Vlastnosti vypouštěné látky	inertní, nedeponující	

stanic a potřebná velikost emise. Koncem roku 1994 byly na základě meteorologické předpovědi vybrány dvě situace ze západním prouděním, kdy byl oprávněný předpoklad, že stopovací látka emitovaná v západní Francii bude zaznamenána na měřicích stanicích rozmístěných po Evropě.

Oblast pokrytá měřicími stanicemi zasahovala od jižních částí Velké Británie po Rumunsko a Bulharska po jižní části Norska. Výpočetní modelová oblast stanovená byla o něco větší ($10^{\circ}\text{W} - 38^{\circ}\text{E}$, $32^{\circ}\text{N} - 68^{\circ}\text{N}$) zabírala tak téměř 14 mil km^2 , zatímco stanice pokrývají jen něco kolem 3 mil km^2 .

obrázek 9 Zařízení pro vypuštění stopovací látky v rámci ETEXu



6.2. Meteorologické podmínky

Na základě obvyklého průběhu počasí v Evropě a na základě dalších administrativních důvodů bylo stanoveno období vhodné pro experiment mezi 15.říjnem a 20.prosincem 1994. V tomto období byla v řídicím centru hodnocena aktuální meteorologická situace společně s předpovědí na základě modelu DWD. Kritéria pro výběr aktuálního termínu byla stanovena následovně:

1. silnější západní až jihozápadní proudění, které zajistí přenos stopovací látky ve směru, kde byly rozmístěny měřicí stanice

2. v zájmové oblasti ani v její těsné blízkosti se nebude nacházet střed tlakové níže nebo výše, stejně tak rozšiřující se hřebeny vysokého tlaku nebo prohlubující se brázdy
3. přes místo emise nebude přecházet v době vypouštění stopovací látky ani těsně před tím žádný frontální systém

6.2.1. 1. experiment

Na základě výše uvedených kritérií byl pro 1. experiment vybrán termín 23. října 1994.

23.10.1994 Tlaková níže (975 hPa), která se nacházela nad Skotskem se pomalu přesouvala k severu. V místě emise bylo silné jihozápadní proudění. Advehovaný vzduch byl labilní, s přeháňkami, místy doprovázenými bouřkami.

24.10.1994 Řídící tlaková níže přesunula poněkud k severu. V oblasti Rennes se proto proudění stočilo k západu a poklesla jeho rychlost. Nad Evropu se nacházela brázda nízkého tlaku vzduchu.

25.10.1994 Tlaková níže se poněkud vyplňovala, nad Nizozemím přecházela studená fronta. Nad Evropu bylo jižní až jihozápadní proudění.

26.10.1994 Tlaková níže se nacházela nad Severním mořem, vítr se stáčil k západojihozápadu. Nad Černým mořem se vytvářela tlaková výše a s ní související jižní proudění blokuje transport stopovací látky dále k východu.

6.2.2. 2. experiment

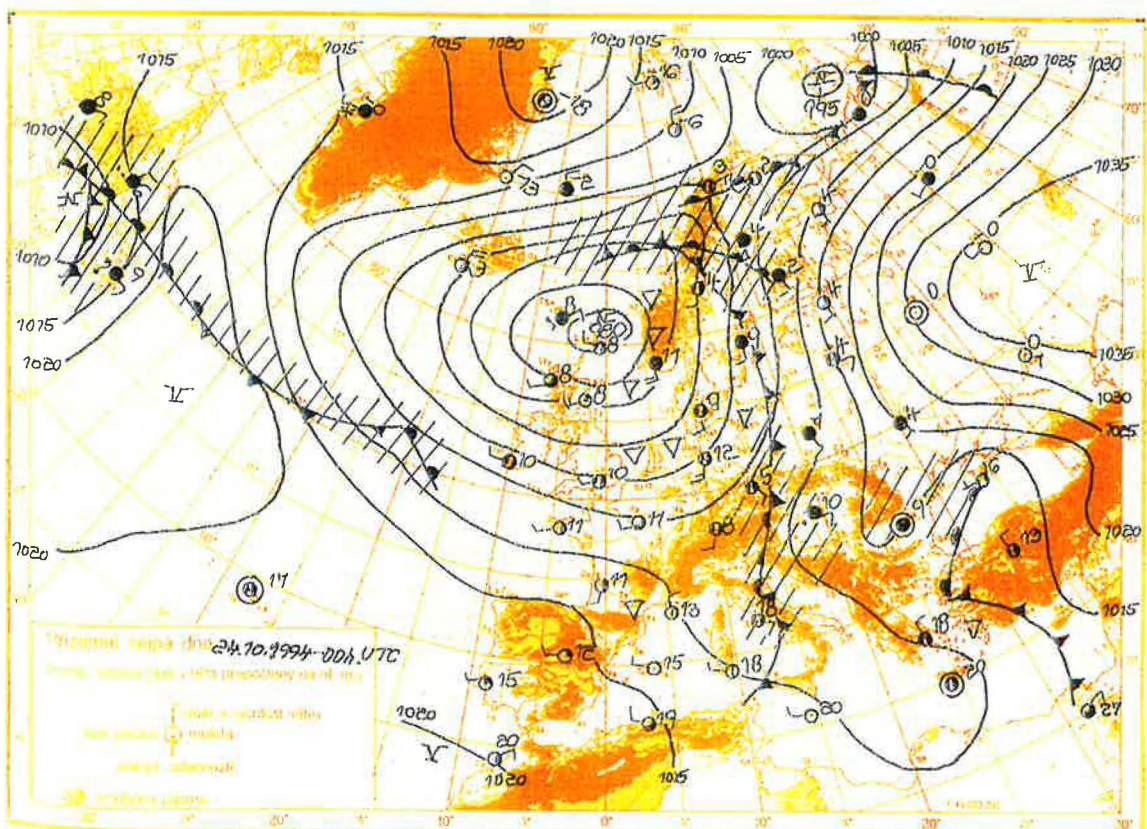
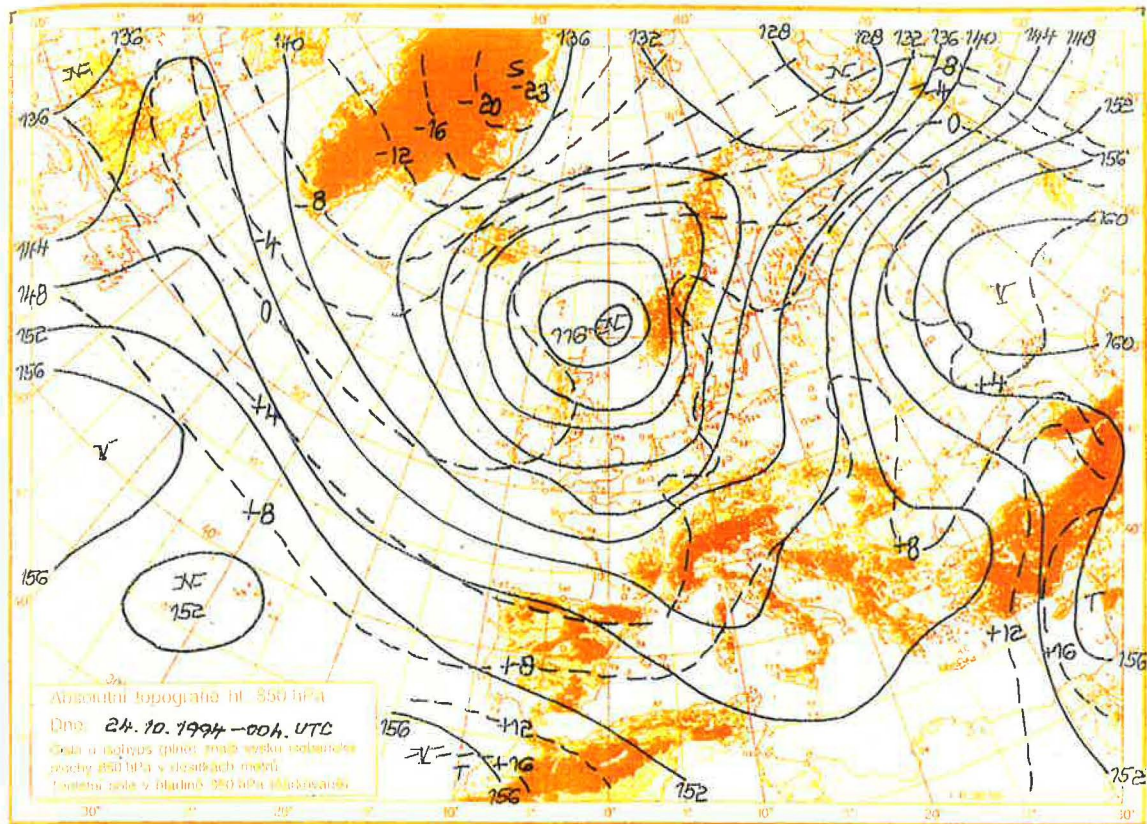
Po skončení 1. experimentu se vytvořila nad střední Evropou oblast vysokého tlaku, provázená v západní Francii jižním prouděním, které neumožňovalo přenos stopovací látky nad Evropou. Ke změně situace došlo 12. listopadu, kdy od západu přešel slabý frontální systém. 14. listopadu pak byla situace vhodná pro ETEX experiment.

V době, kdy přicházel v úvahu 2. experiment, již bylo zřejmé, že 1. byl úspěšný. Proto bylo poněkud změkčeno třetí kritérium na zahájení experimentu: vypuštění stopovací látky krátce před přechodem fronty (přechod fronty může narušit podmínky pro srovnání modelů – záleží na přesném stanovení času přechodu fronty předpovědním modelem).

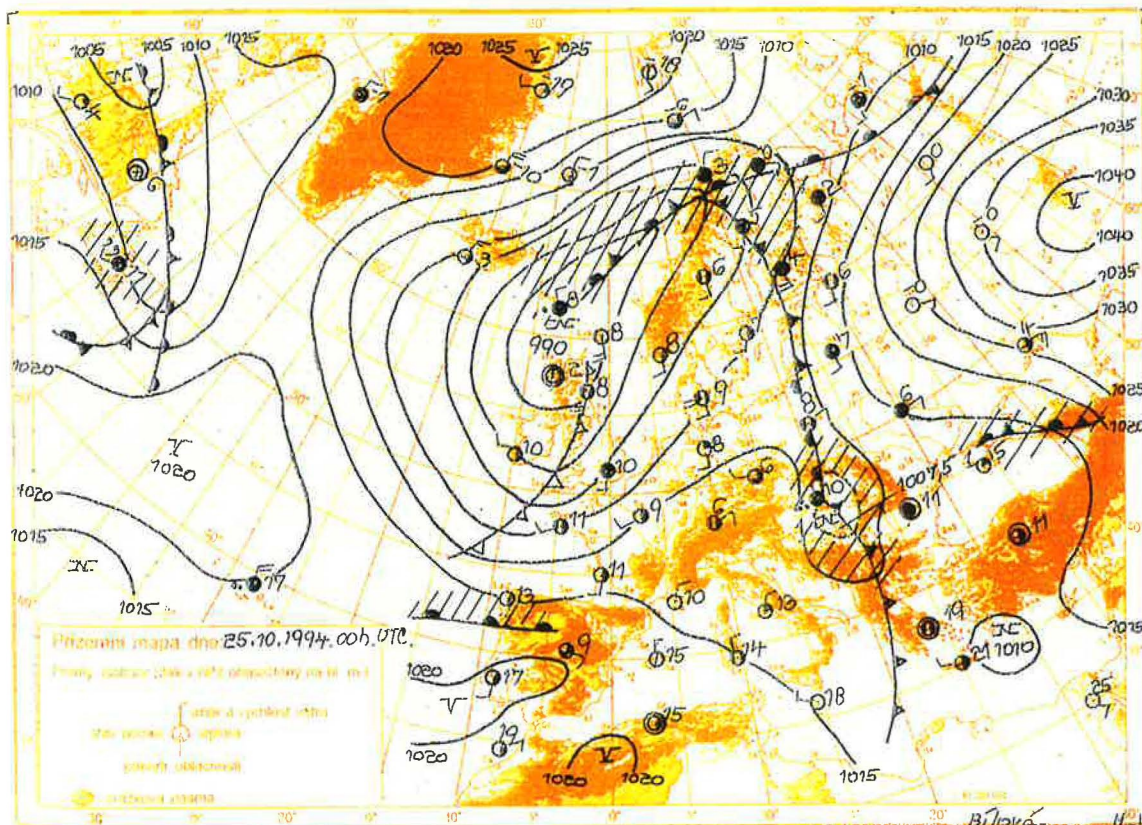
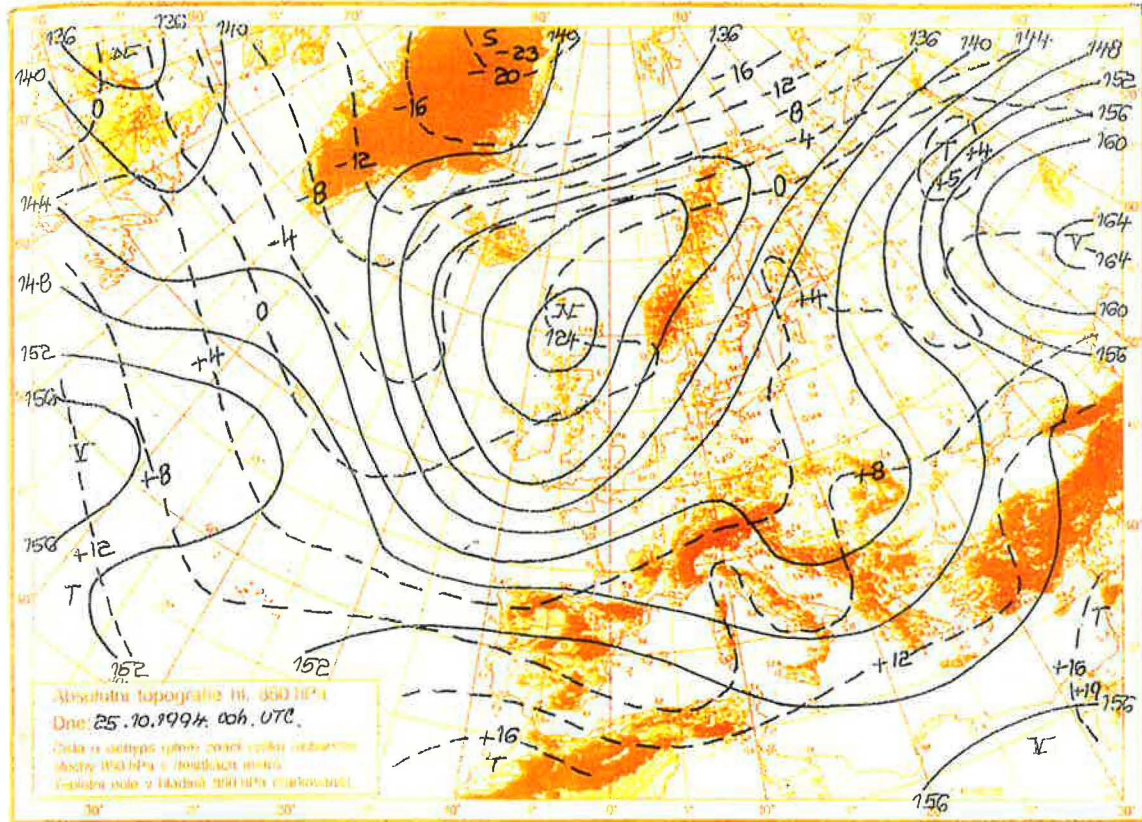
14.11.1994 Mezi Islandem a Norskem se nacházela tlaková níže (975 hPa), která se pomalu přesouvala k východu. Od Dánska přes Nizozemí až po Azory se táhla studená fronta, po které se přesouvala malá frontální vlna, která zbrzdila přechod celé fronty přes západní Francii. V centrálním Rusku se nacházela oblast vysokého tlaku přesunující se pomalu k východu. Jihozápadní proudění nad Rennes přinášelo mírně teplý vzduch.

15.11.1994 Ve 3:00 UTC přešla přes Rennes studená fronta. Po jejím přechodu se rychlost proudění snížila a jeho směr se stočil k západu. Tlaková níže se přesunula nad Skandinávii. Studená fronta se táhla od Azor, přes Biskajský záliv, Německo a Polsko do Finska.

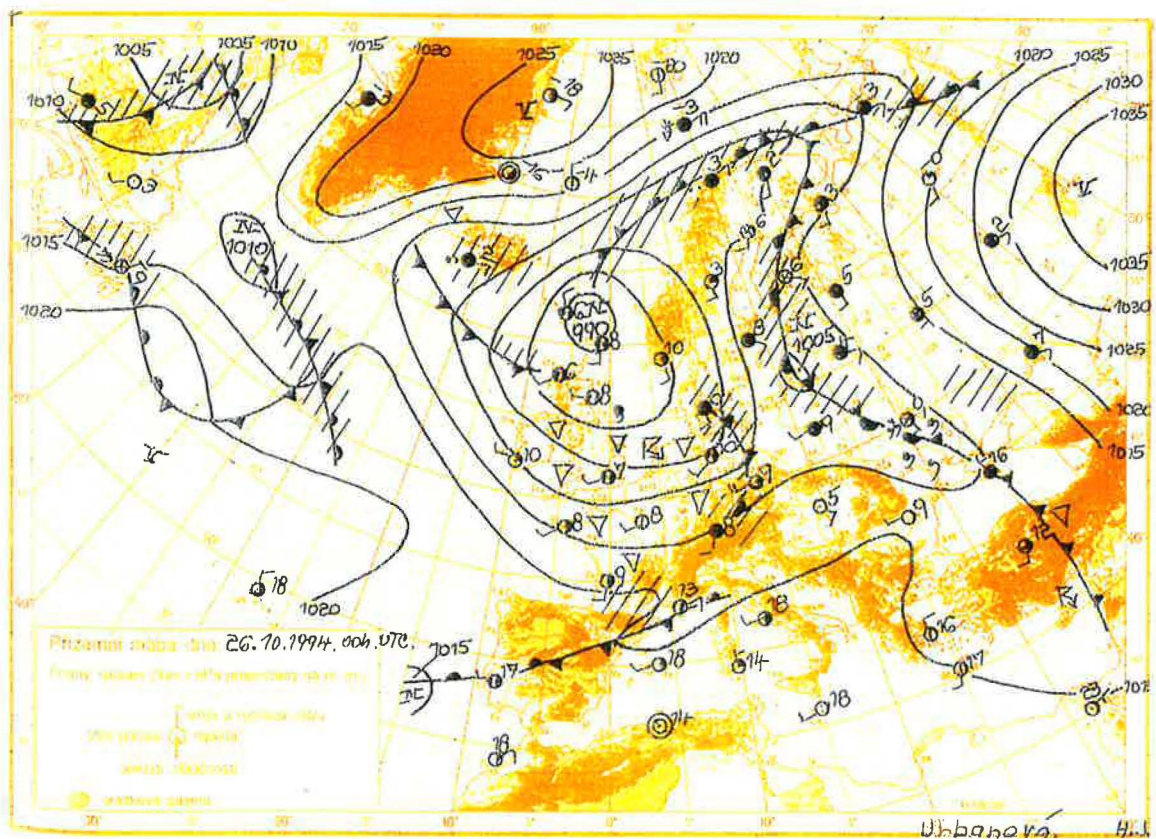
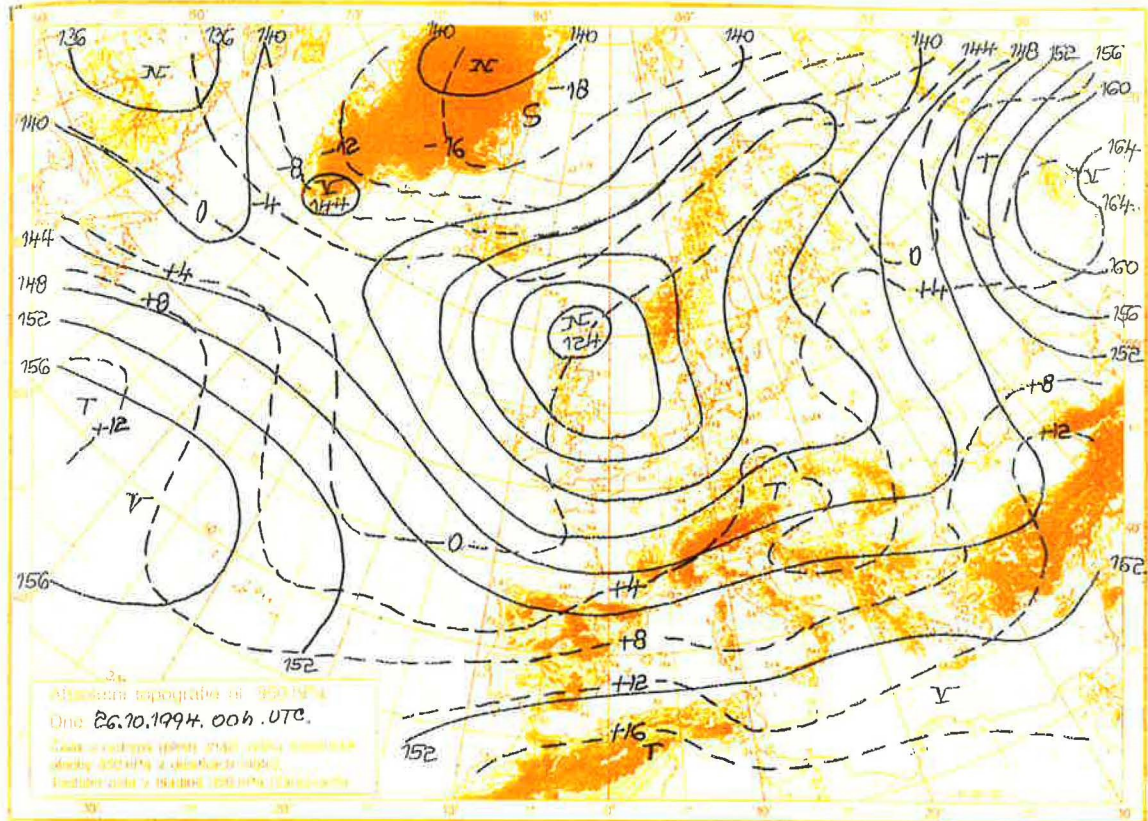
obrázek 11 Meteorologická situace dne 24.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment)



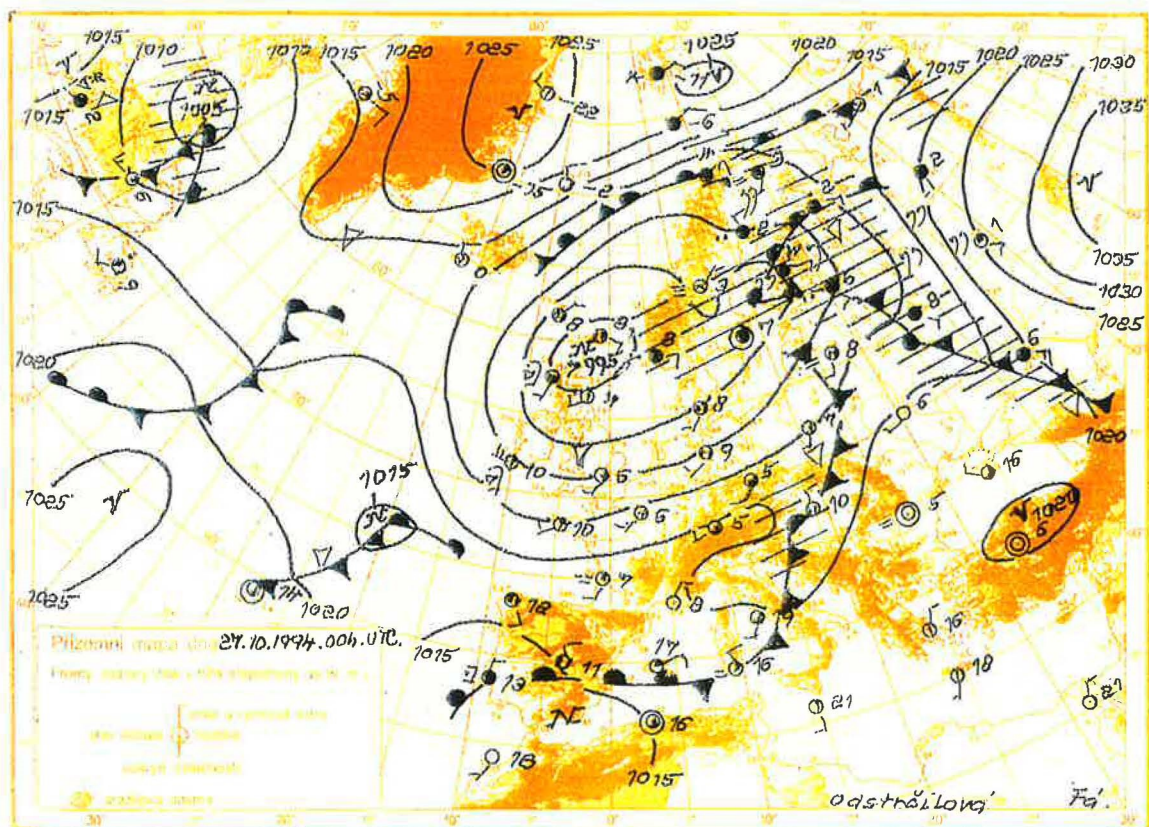
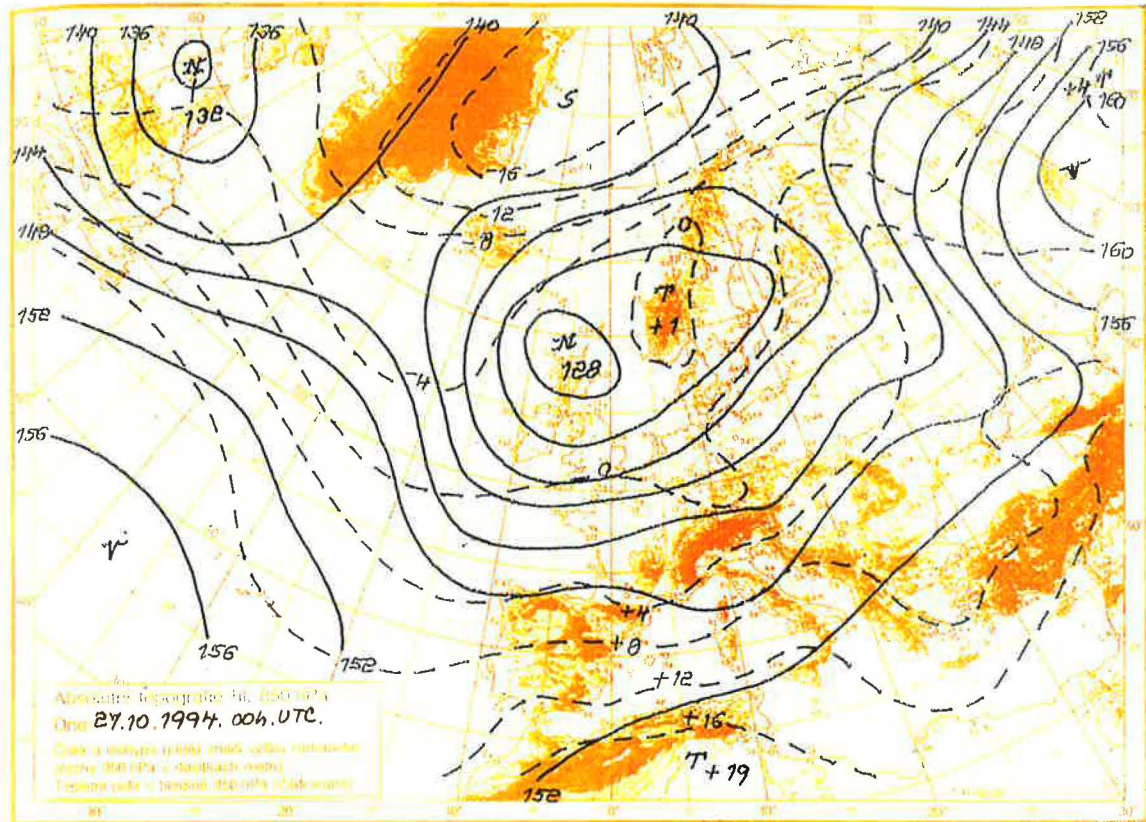
obrázek 12 Meteorologická situace dne 25.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment)



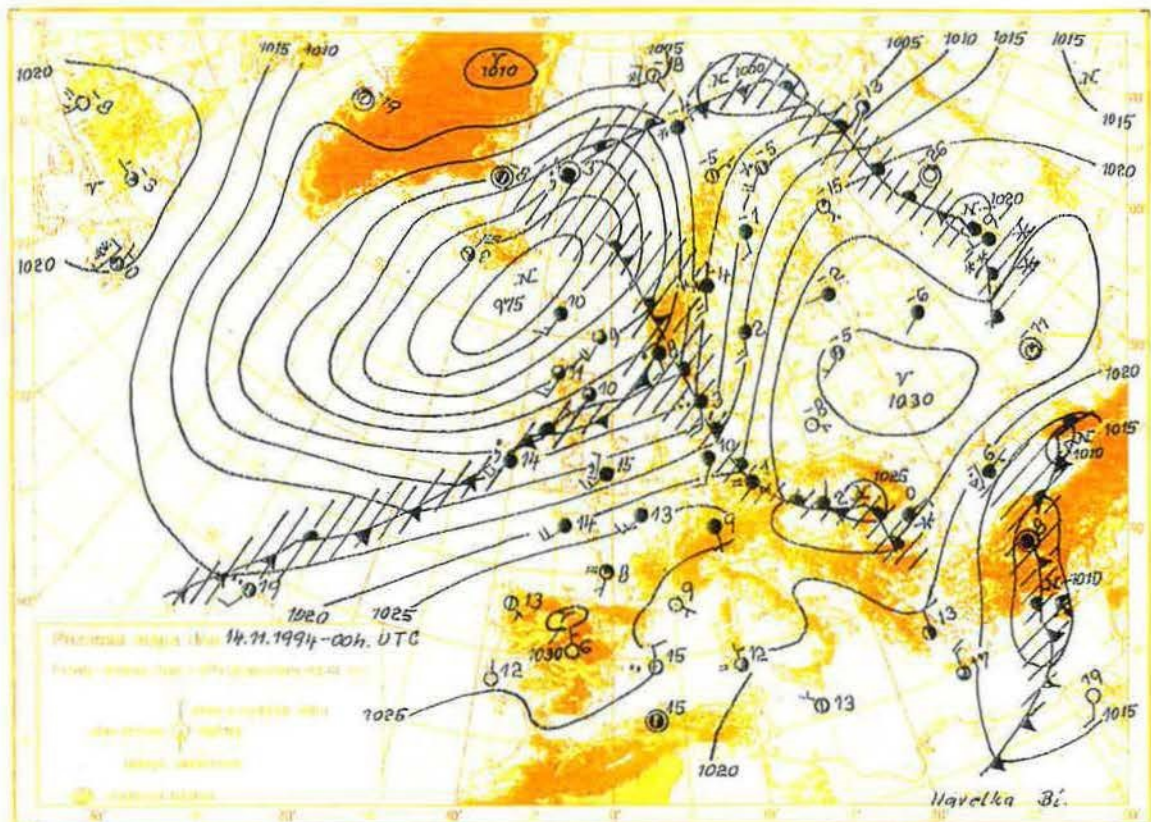
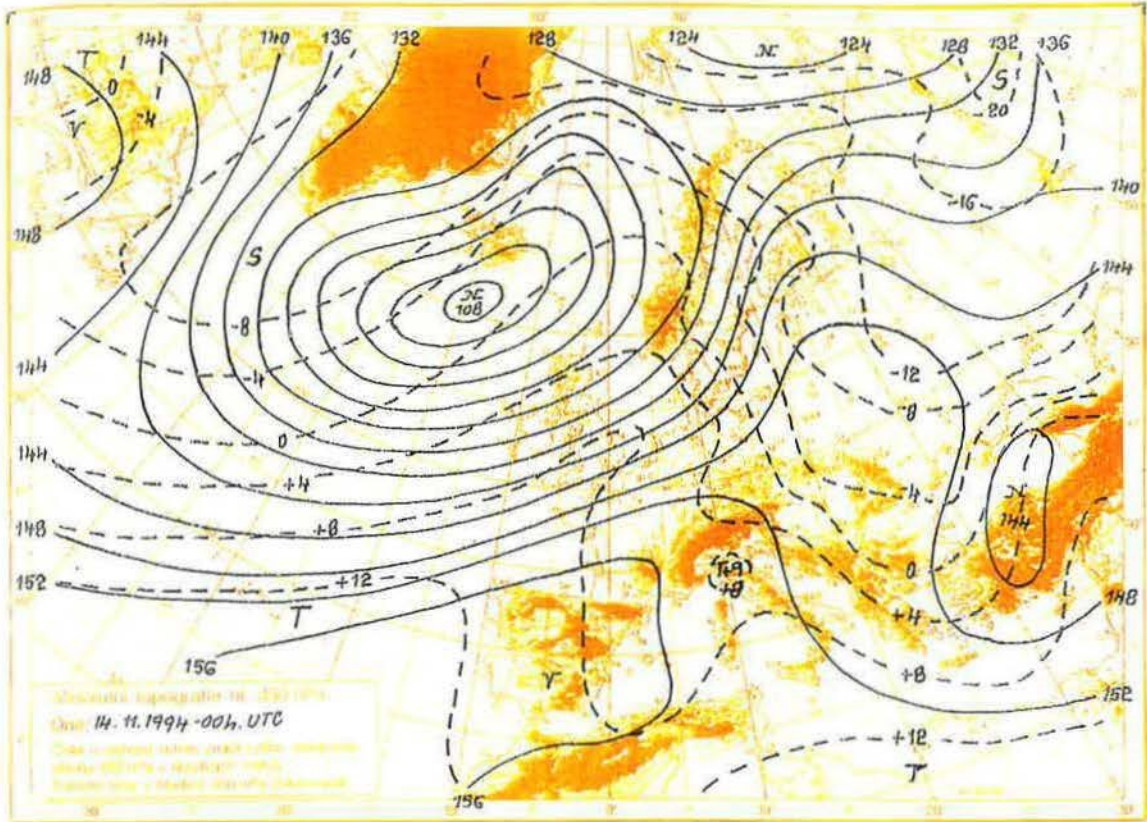
obrázek 13 Meteorologická situace dne 26.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment)



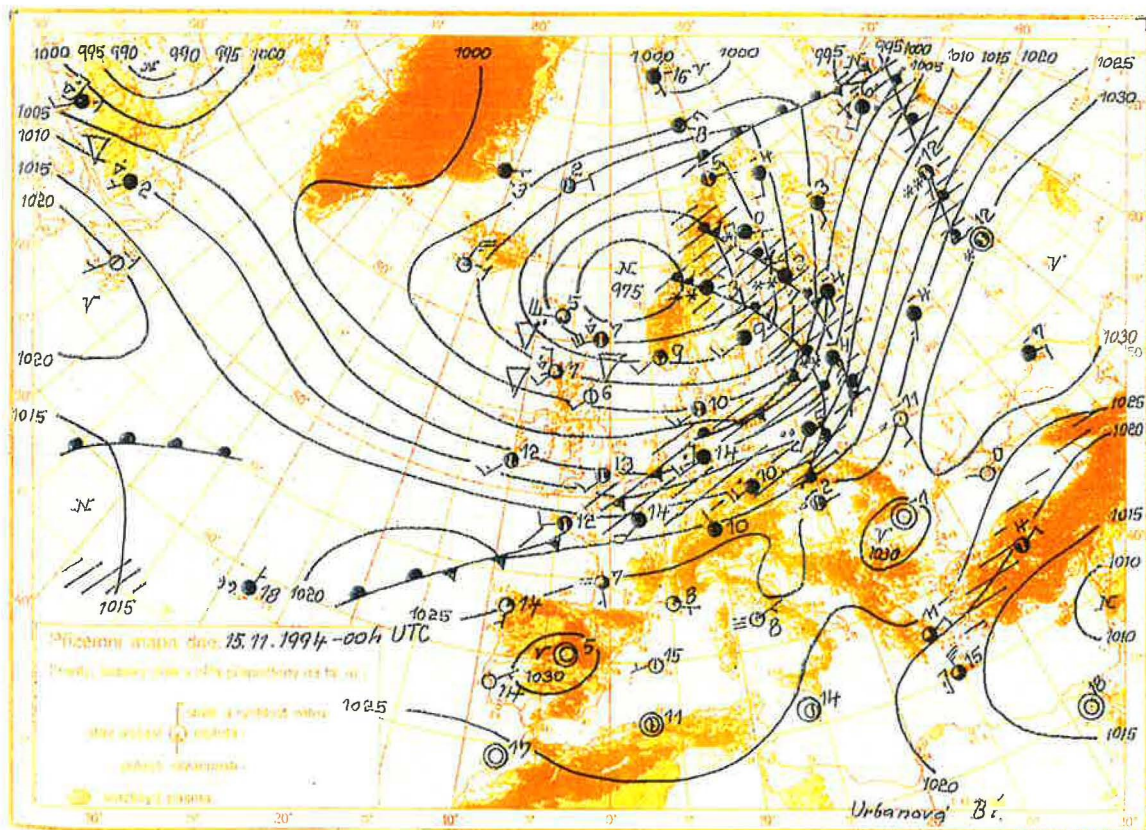
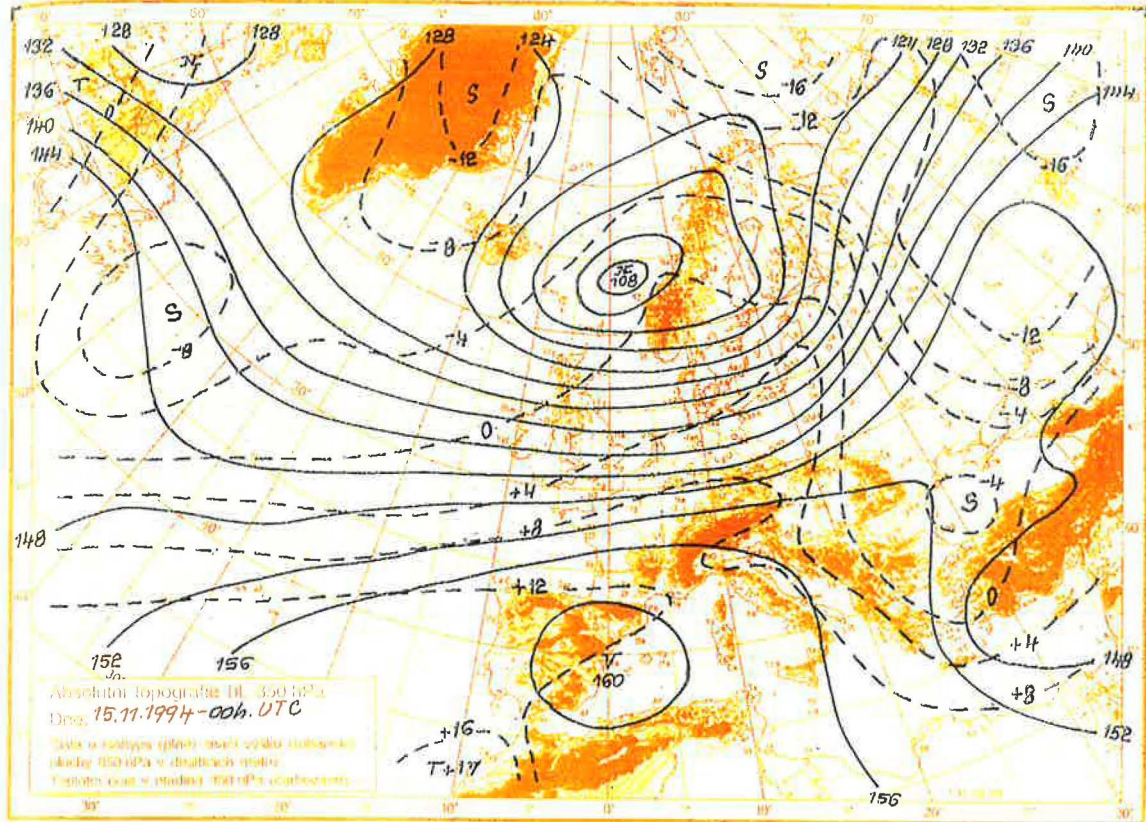
obrazek 14 Meteorologická situace dne 27.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment)



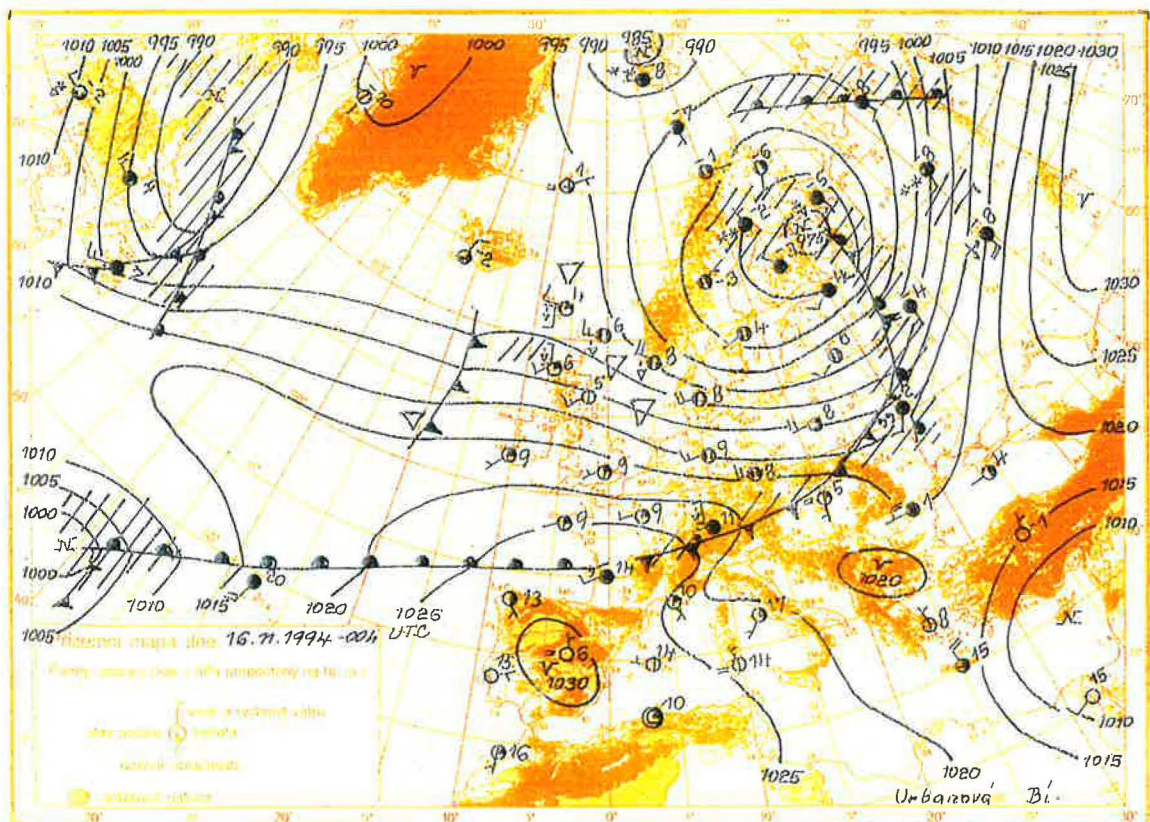
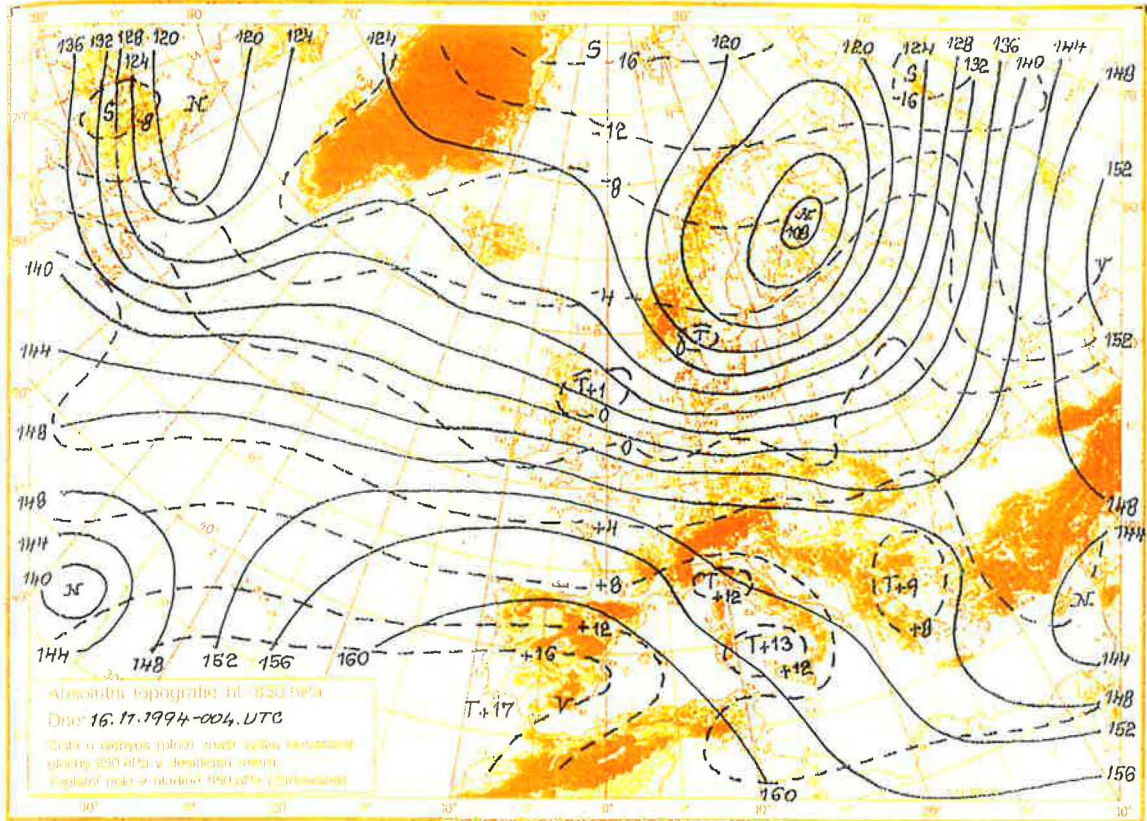
obrázek 15 Meteorologická situace dne 14.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)



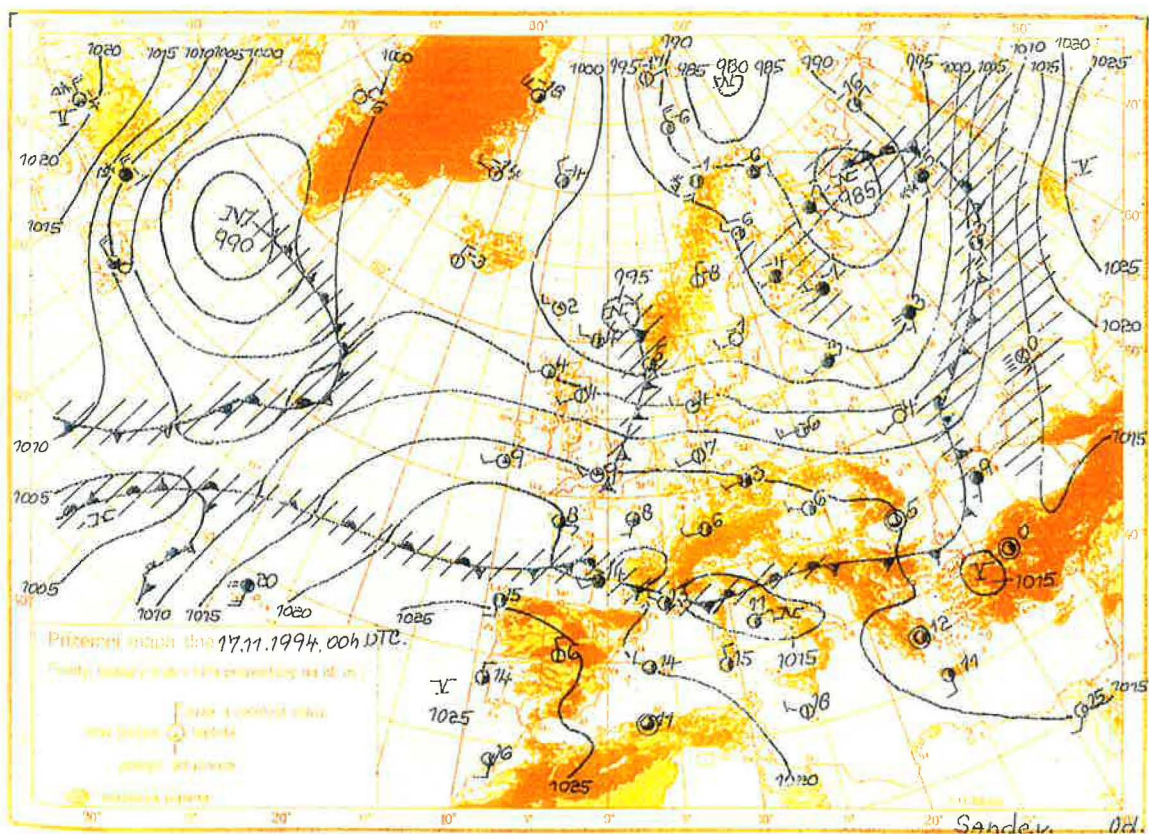
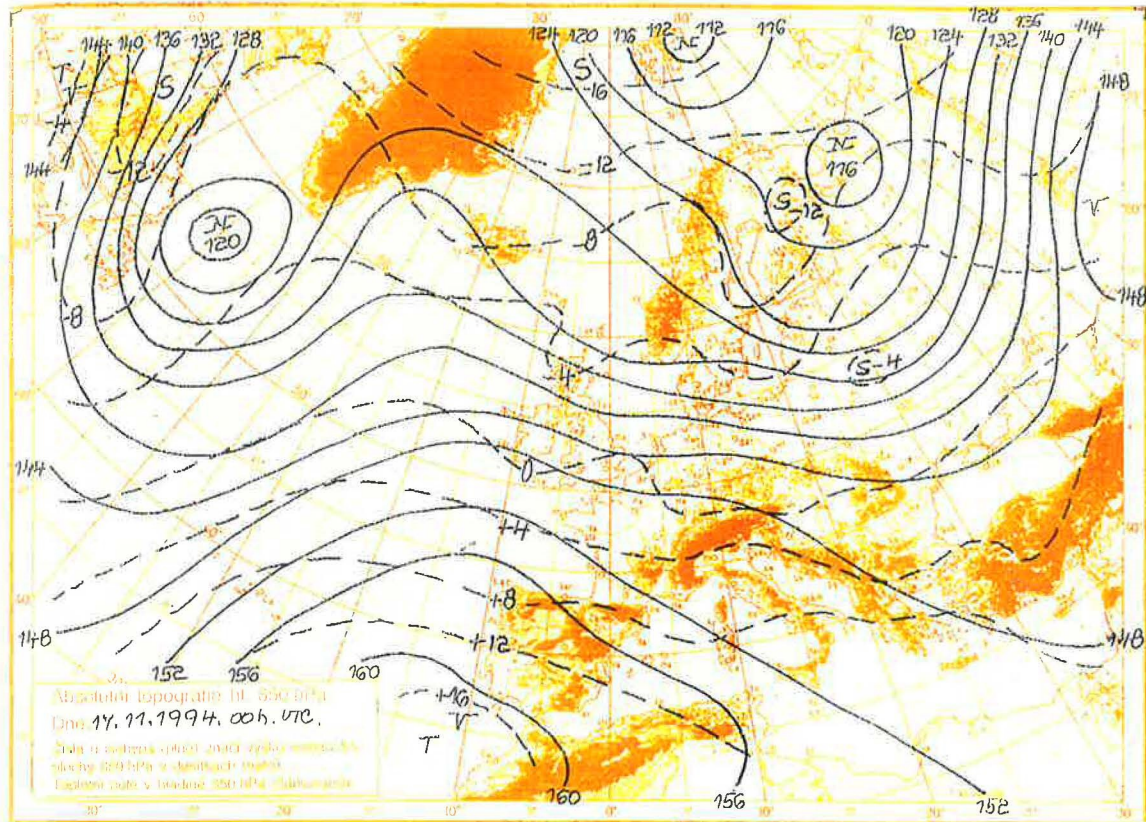
obrázek 16 Meteorologická situace dne 15.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)



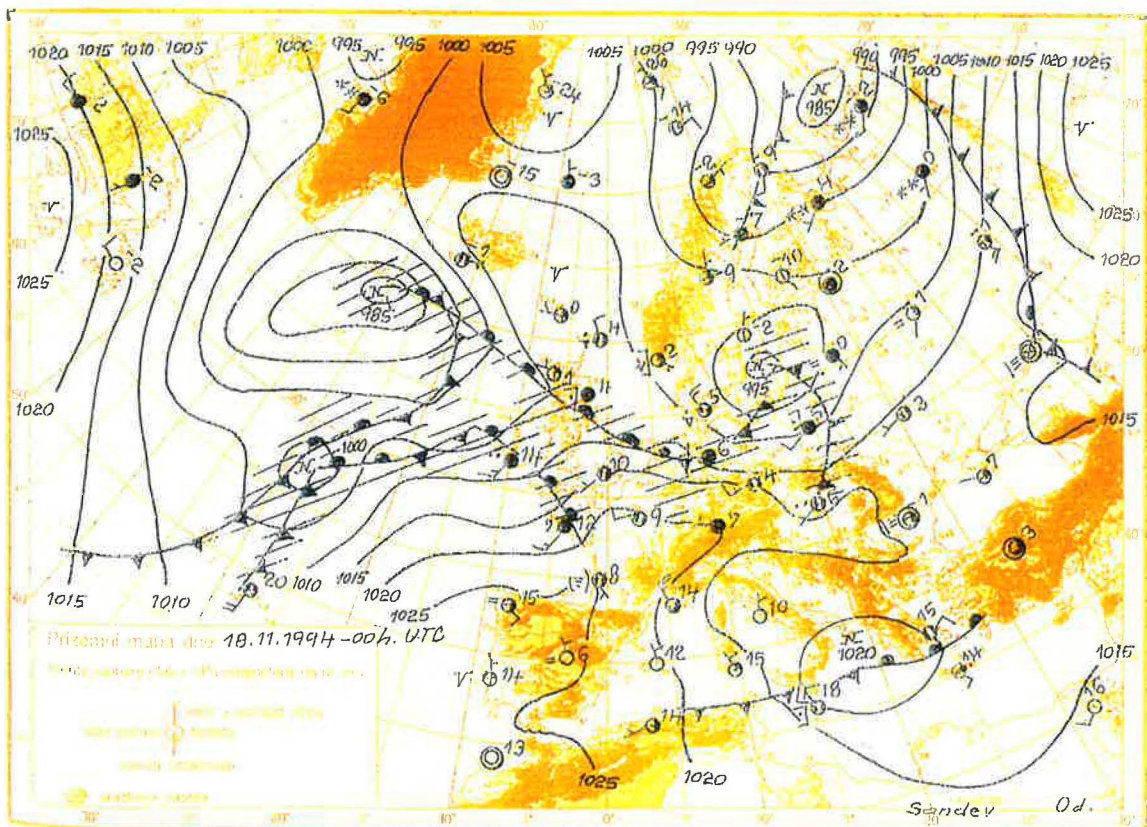
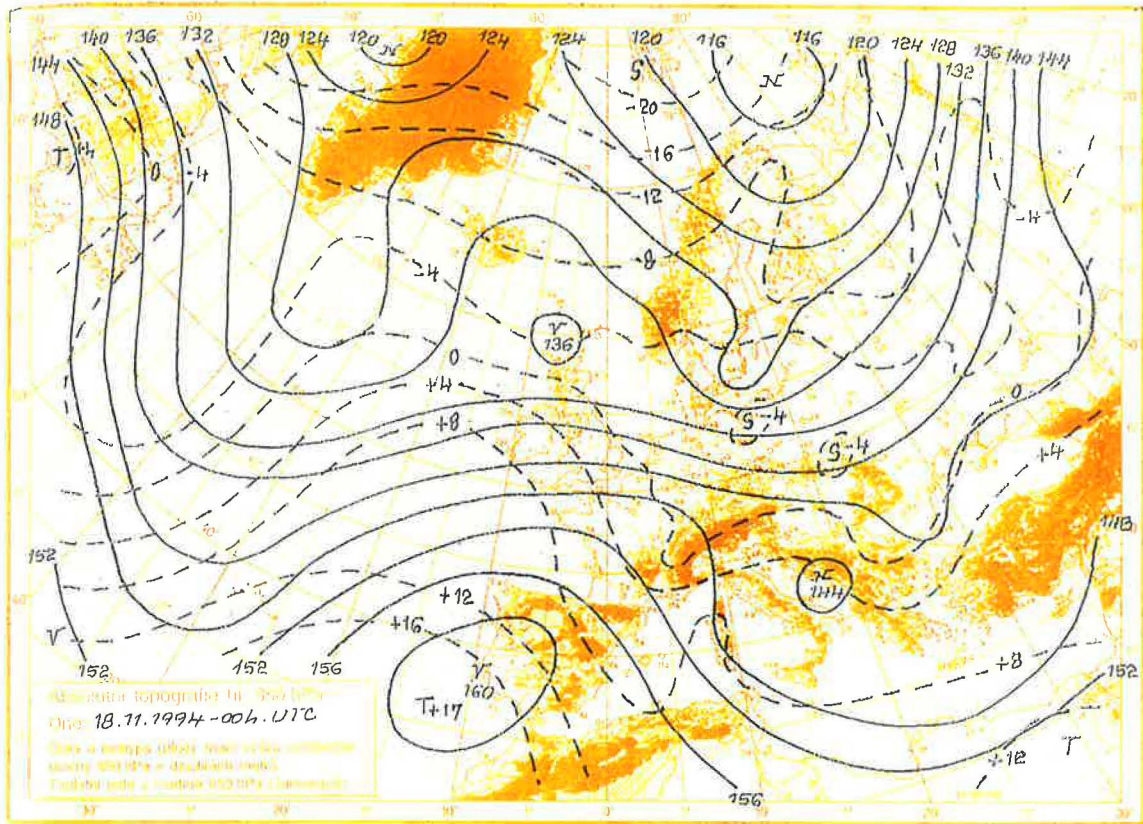
obrázek 17 Meteorologická situace dne 16.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)



obrázek 18 Meteorologická situace dne 17.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)



obrázek 19 Meteorologická situace dne 18.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)



16.11.1994 Nad Finskem se nacházela tlaková níže, jejíž frontální systém stále zasahoval po Biskajský záliv a táhmul se jižně od italských Alp, přes Balkán do Finska. Nad Evropou bylo severozápadní proudění.

17.11.1994 Nad Španělskem a Biskajským zálivem se formoval hřeben vysokého tlaku a přesunoval se nad Nizozemí a Německo. Nad střední Evropou bylo mírné západní proudění.

6.3. Pohyb oblaku

Posun oblaku byl zpětně vyhodnocen za pomoci naměřených hodnot na stanicích rozmístěných po Evropě.

6.3.1. 1. experiment

T+24 horizontální rozměr oblaku byl již poměrně velký, podle měření se rozdělil na dvě části (toto rozdělení ovšem nemuselo být reálné, ale mohlo být zapříčiněno problémy na měřicích stanicích). Střed oblaku se nacházel blízko hranice Belgie a Německa.

T+36 stopovací látka již z velké části opustila Francii, maximální hodnota byla zaznamenána v Německu. V tomto čase nebylo pozorováno rozdělení oblaku na dvě části (s výjimkou malé oblasti zaznamenaných hodnot v Rumunsku – výskyt stopovací látky mohl být způsoben přenosem velmi rychlým prouděním ve výšce).

T+48 oblak se protáhl v severojižním směru a zasahuje oblast od Dánska přes Německo, Polsko, Českou republiku, Slovensko až do Maďarska a Rumunska. Došlo tedy k jeho otočení o 90° vůči původnímu směru přesunu.

T+60 oblak je stále protažen v severojižním směru, jsou patrné dvě oblasti maxim, výraznější se nachází nad Severním mořem, druhá slabší je nad Slovenskem.

6.3.2. 2. experiment

T+12 oblak je roztažený v severovýchodním směru a je rozdělen na dvě části (rozdělení může opět být reálné nebo zapříčiněné problémy s měřením). Maximum se nachází nad Francií, druhá část je nad Beneluxem.

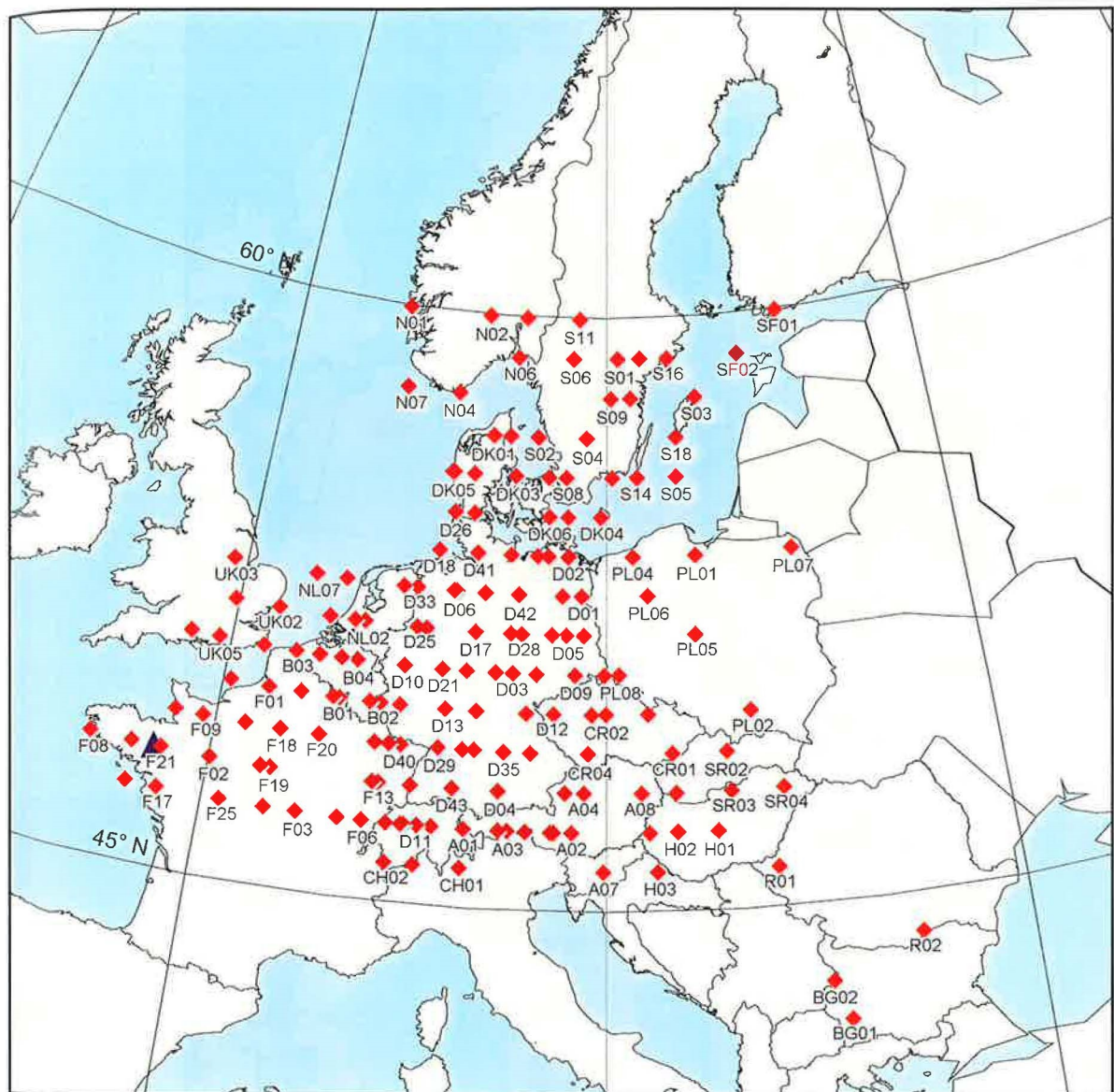
T+24 oblak má poměrně velký horizontální rozměr, ale byly naměřeny nízké koncentrace. Čelo oblaku se relativně velkou rychlostí k východu. Je rozdělen do několika samostatných částí.

T+36 oblak se pomalu přesunuje pomalu přes Francii. Východní část již pravděpodobně opustila měřicí oblast.

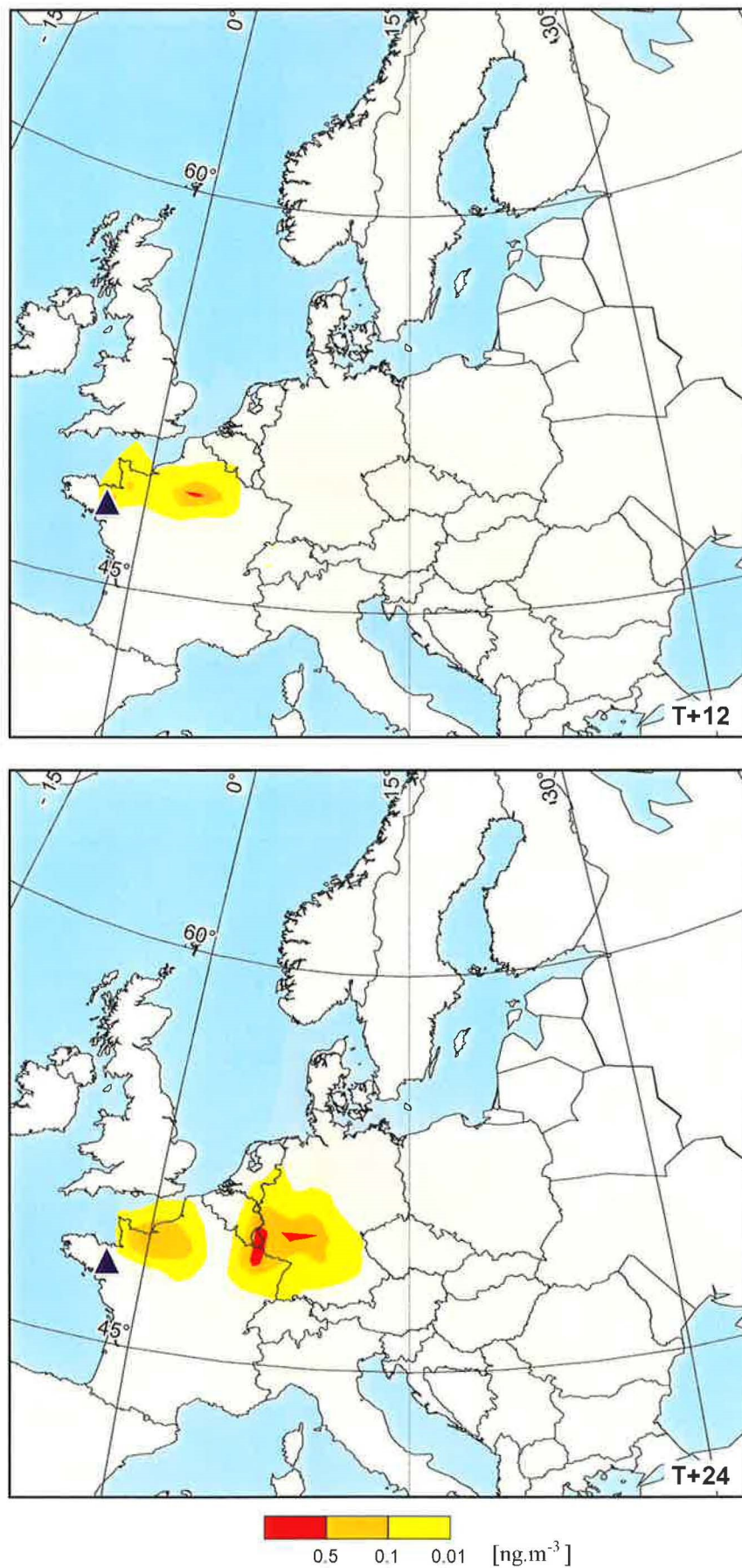
T+48 stopovací látka byla již zaznamenána pouze v malých oblastech východní Francie a jižního Německa

T+60 oblak byl zaznamenán pouze v jižním Německu

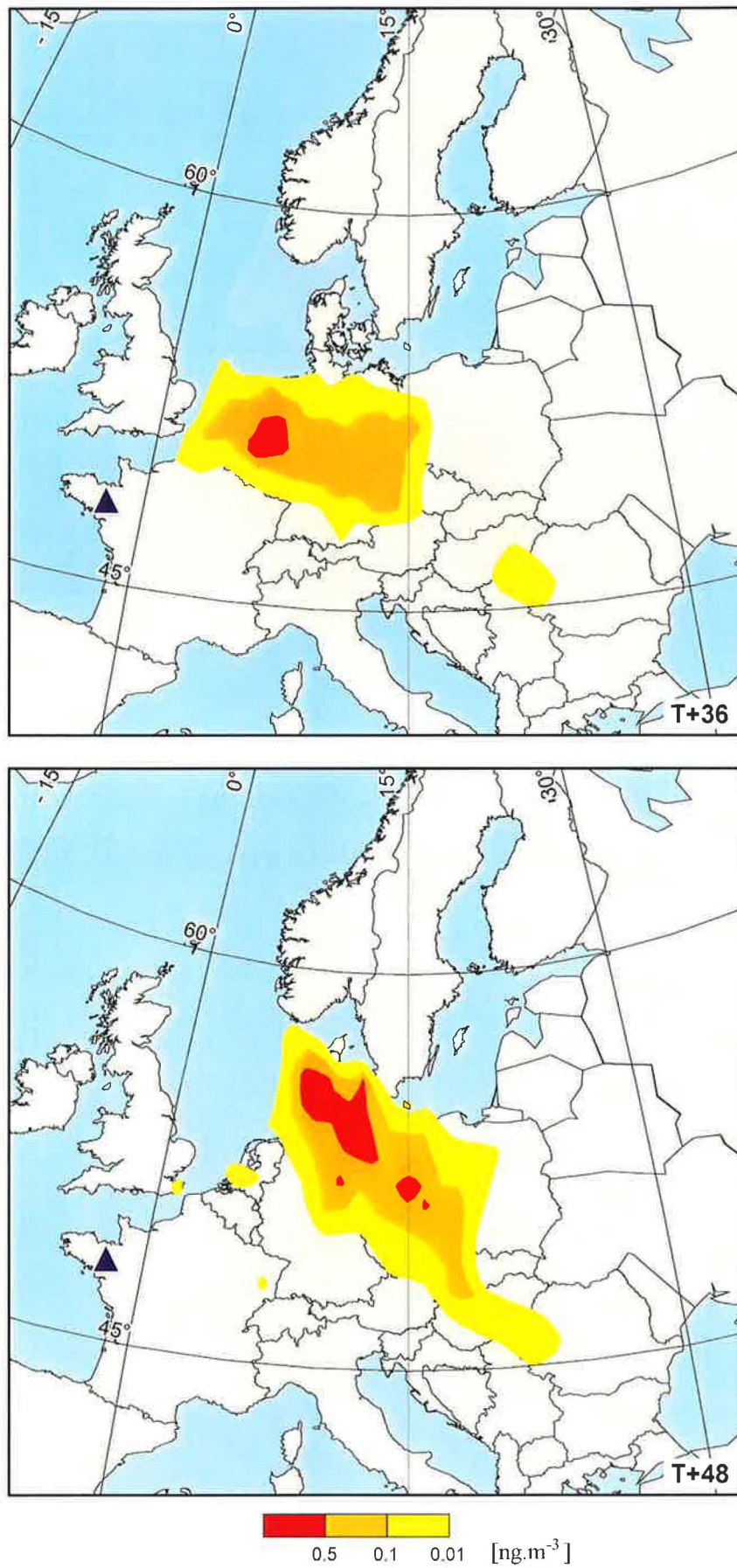
V 2. experimentu byla úspěšnost měření na stanicích nižší než v 1. (cca poloviční). Nebyl zaznamenán souvislý oblak a velkou část hmoty (75%) nelze z měření reprodukovat



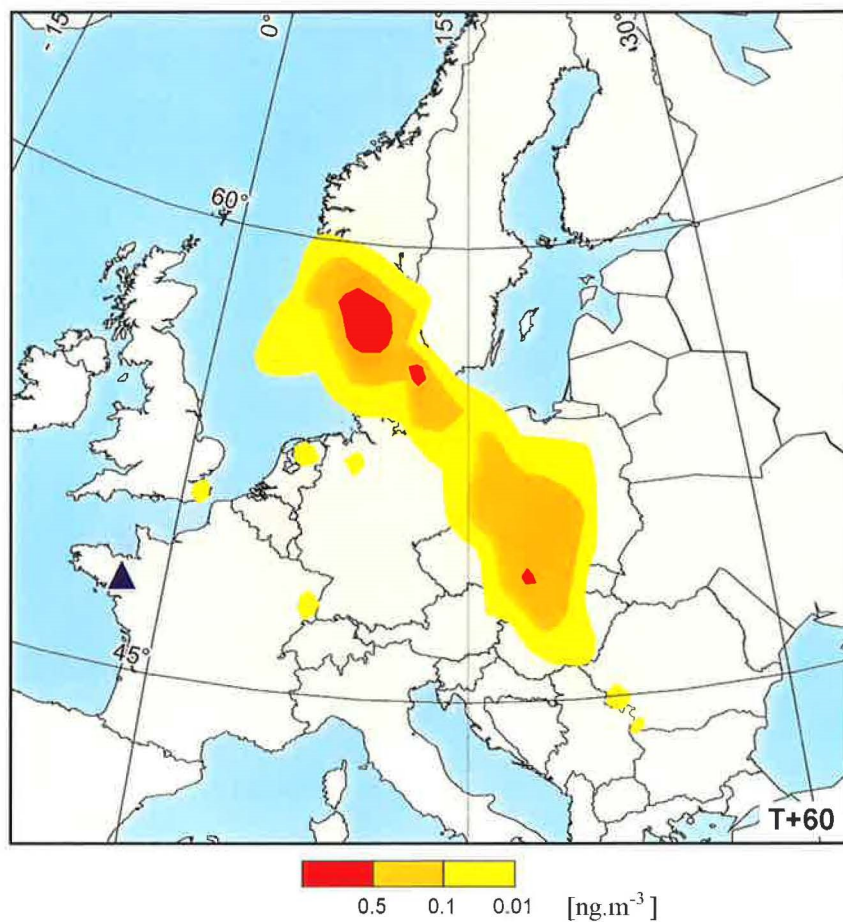
obrázek 20 Seznam měřicích stanic experimentu ETEX



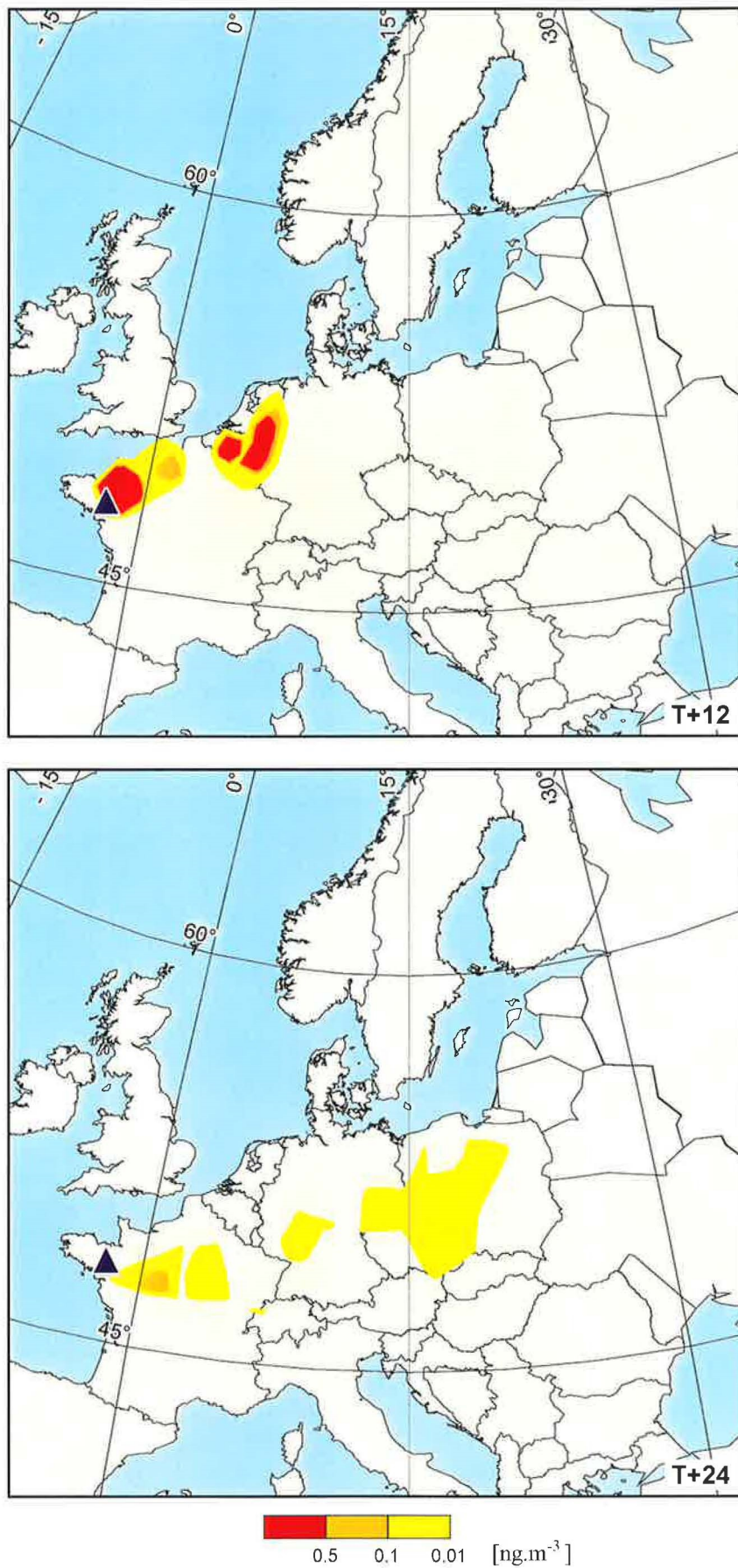
obrázek 21 ETEX 1: Měřený oblak po 12 (nahore), resp. po 24 hodinách od začátku experimentu



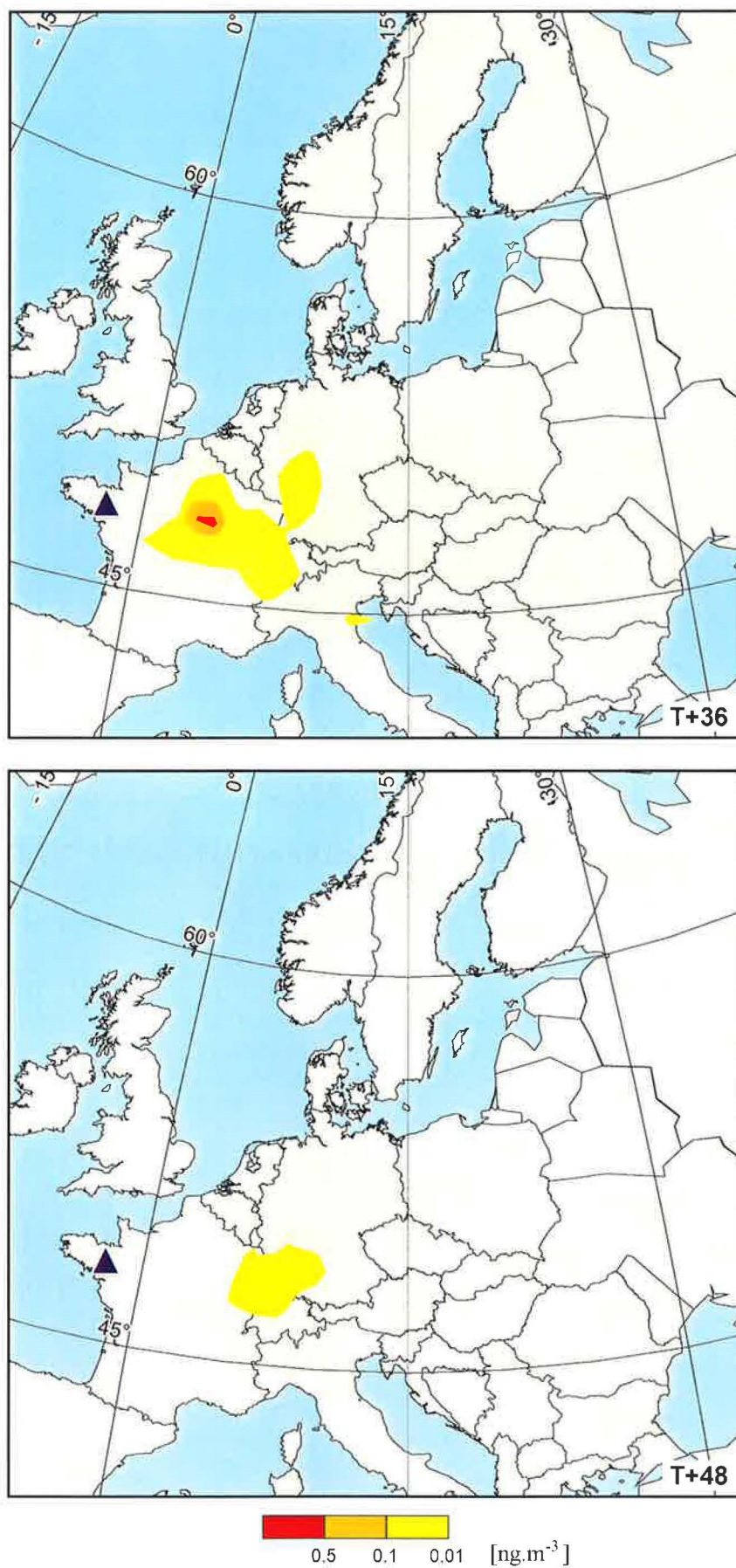
obrázek 22 ETEX 1: Měřený oblak po 36 (nahore), resp. po 48 hodinách (dole) od začátku experimentu



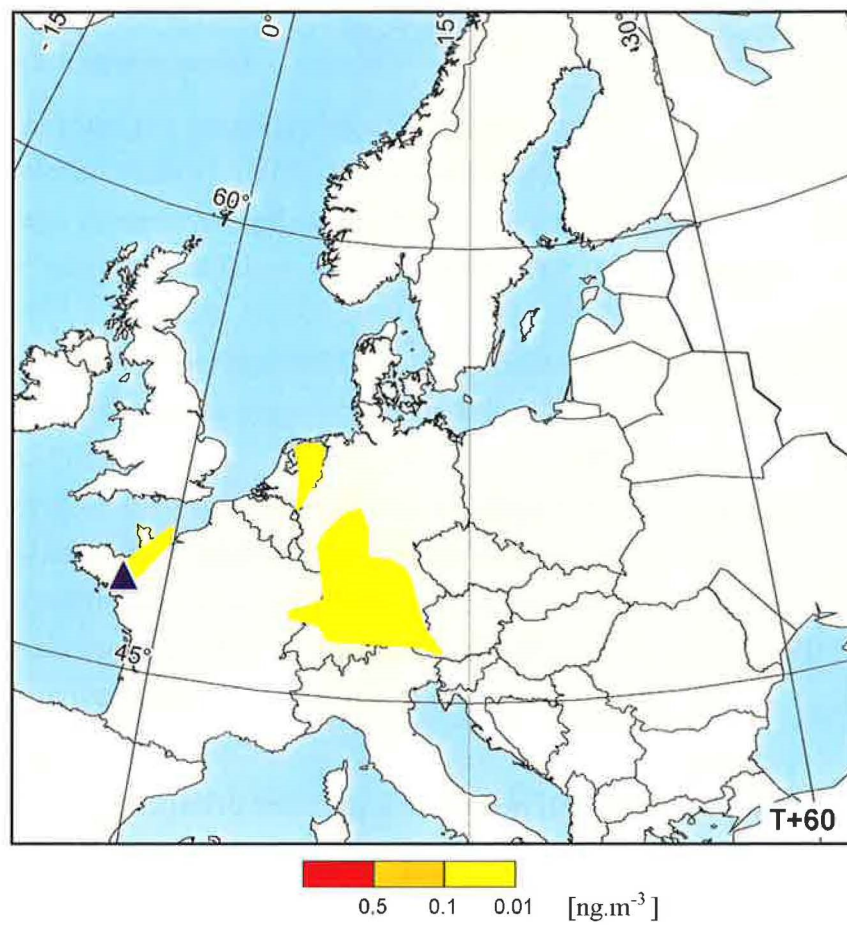
obrázek 23 ETEX 1: Měřený oblak po 60 hodinách od začátku experimentu



obrázek 24 ETEX 2: Měřený oblak po 12 (nahore), resp. po 24 hodinách (dole) od začátku experimentu



obrázek 25 ETEX 2: Měřený oblak po 36 (nahore), resp. po 48 hodinách (dole) od začátku experimentu



obrázek 26 ETEX 2: Měřený oblak po 60 hodinách od začátku experimentu

6.4. Závěry z experimentu

1. byly ověřeny postupy pro pořádání obdobných experimentů;
2. na základě výsledků experimentu byla vytvořena databáze pro testy modelů;
3. přesnost modelů ve stanovení příchodu oblaku nad danou lokalitu je 3-6 hodin, maximální hodnoty byly stanoveny s faktorem 3 – to je také limit přesnosti modelů dálkového transportu;
4. pro správnou předpověď pohybu oblaku na dobu delší než den hraje dominantní roli kvalita předpovědi meteorologických prognózních modelů;
5. nebyly zaznamenány žádné významné rozdíly mezi výsledky Eulerovských a Lagrangeovských modelů (některé Eulerovské modely byly následně zdokonaleny zahrnutím Lagrangeovského přístupu při inicializaci zdroje v subgridovém měřítku);
6. výsledky 2. experimentu ukazují, že stále zůstává mnoho otázek otevřených: na některých stanicích byly zaznamenána dvě maxima, po 60-ti hodinách byly ve Francii znovu naměřeny koncentrace stopovací látky.

6.5. Hodnocení použitého modelu s využitím databáze ETEX

V této práci byly provedeny výpočty transportu a rozptylu stopovací látky za využití databáze ETEX (meteorologická pole poskytnutá z ECMWF, měřené koncentrace na 168 stanicích rozmístěných po Evropě). Výpočty byly provedeny pro různé parametrizace výšky směšovací vrstvy a rozptylových parametrů. Cílem bylo vytipovat nejvhodnější modelové postupy pro budoucí operativní nasazení v rámci Českého hydrometeorologického ústavu.

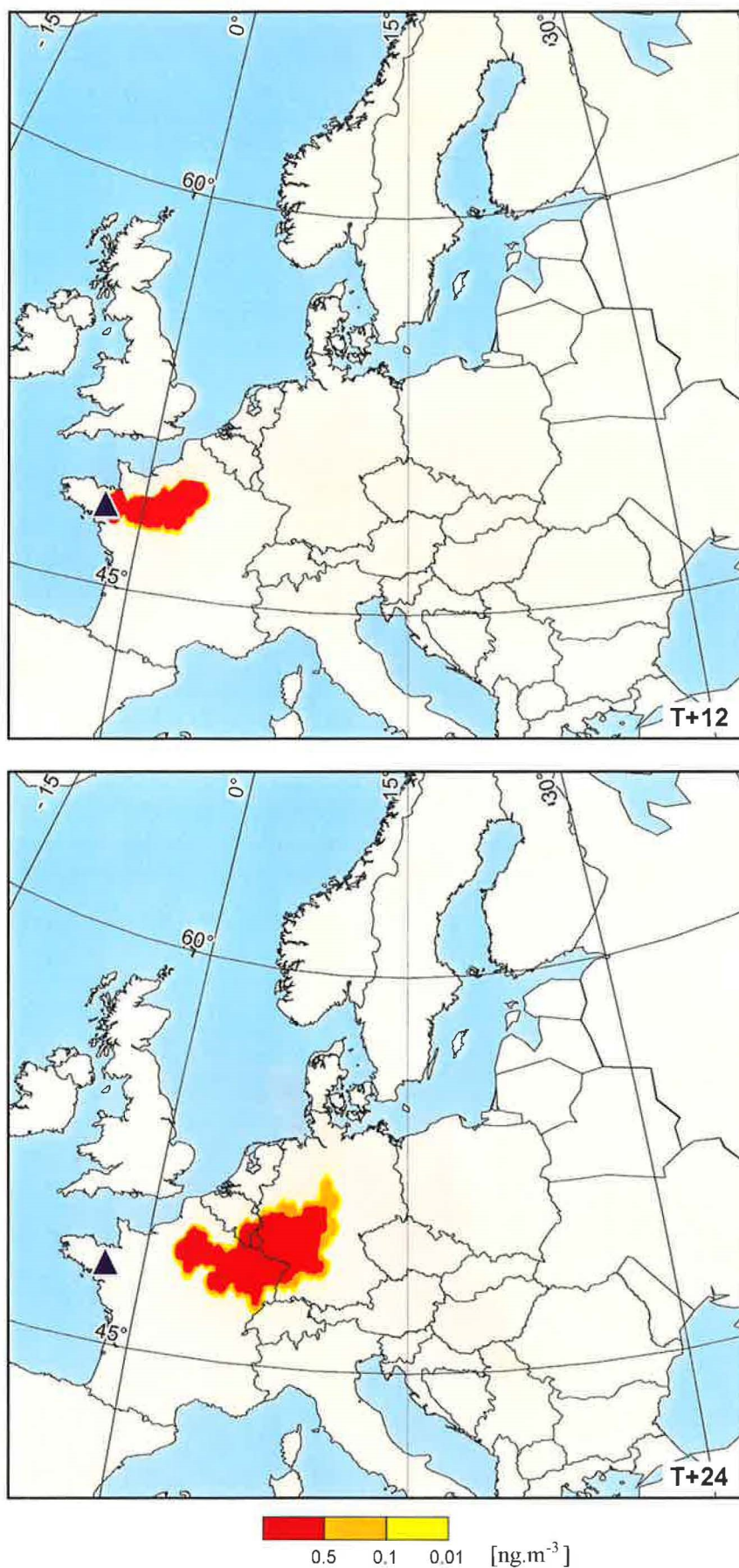
6.5.1. ETEX 1

První experiment poskytl poměrně kvalitní databázi, na které je možno modely spolehlivě testovat. Byly porovnávány výsledky čtyř metod výpočtu výšky směšovací vrstvy (podrobněji viz. kapitola 3.5.):

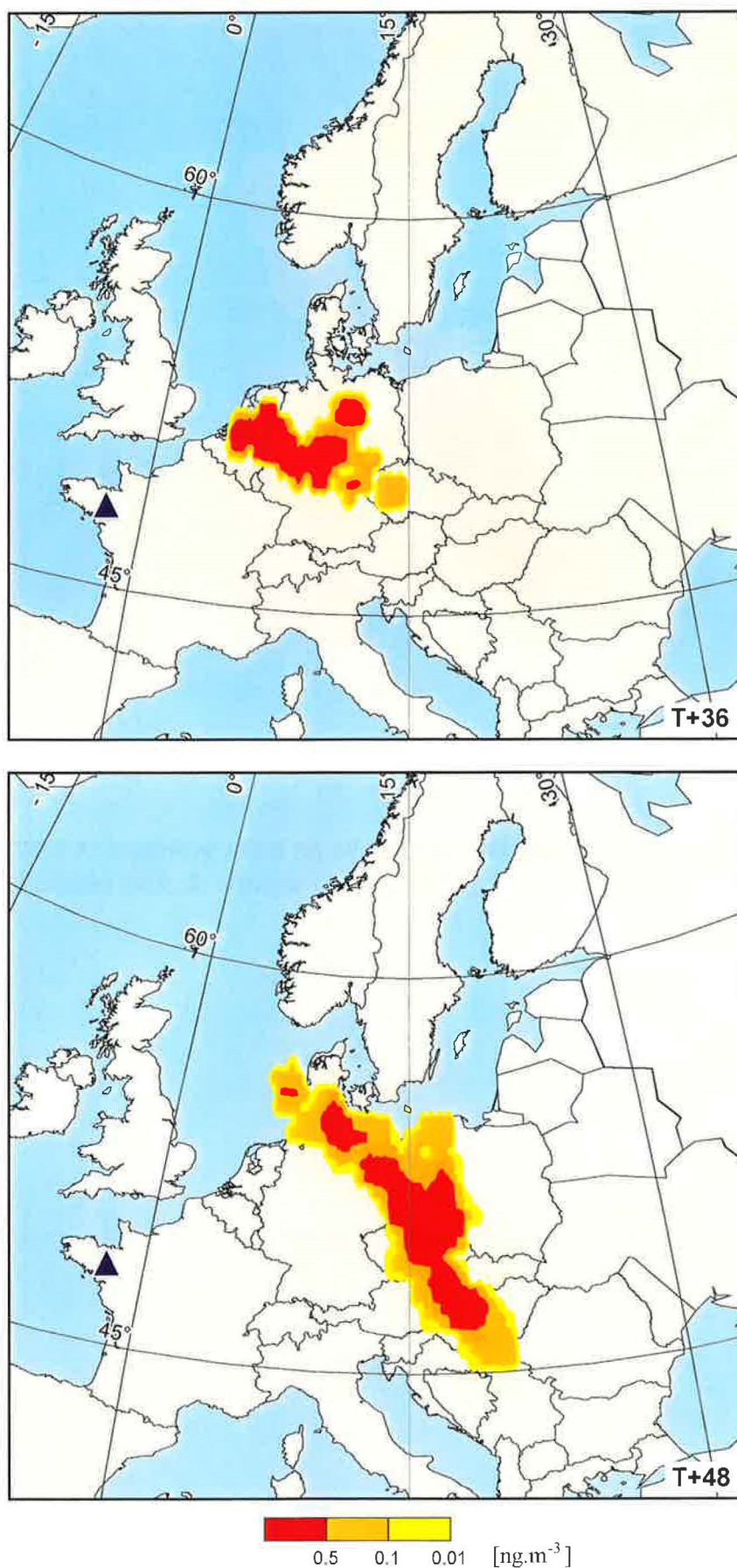
1. metoda založená na vertikálním teplotním gradientu (dále značená jako MIX1). Tento postup je použit v původním modelu vyvinutém v NOAA
2. odhad založený na Richardsonově čísle pro vrstvu (MIX2)
3. modifikovaná metoda vertikálního teplotního gradientu (MIX3)
4. použití konstantní výšky (MIX4)

Pro parametrizaci rozptylu v subgridovém měřítku (viz. kapitola 3.6.2.) byly testovány tři metody výpočtu:

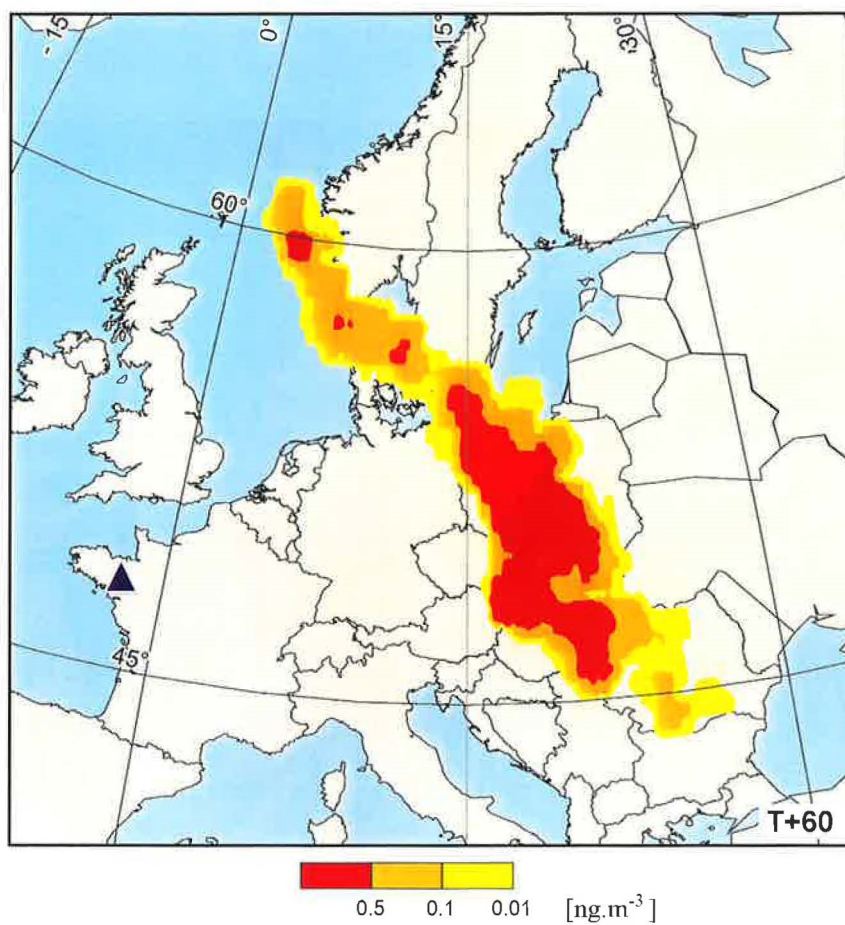
1. metoda použitá v původním modelu HYSPLIT (DSP1)
2. parametrizace založená na Moninově a Obuchovově teorii (DSP2)
3. jednoduchá exponenciální závislost použitá v metodice SYMOS'97 (DSP3)



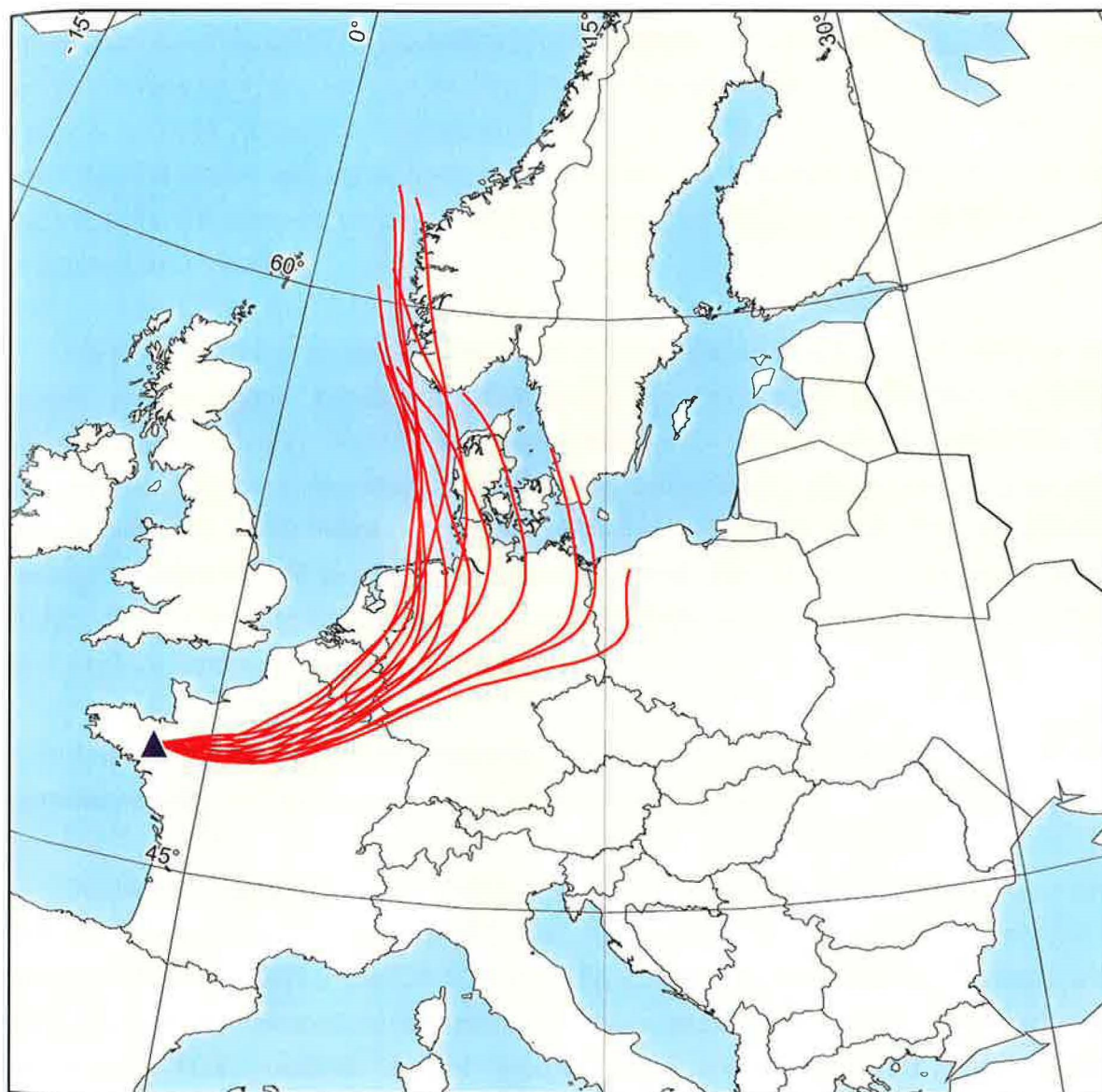
obrázek 27 ETEX 1: Modelový oblak po 12 (nahore), resp. po 24 hodinách (dole) od začátku experimentu (základní metoda výpočtu - MIX1, DSP1)



obrázek 28 ETEX 1: Modelový oblak po 36 (nahore), resp. po 48 hodinách (dole) od začátku experimentu (základní metoda výpočtu - MIX1, DSP1)



obrázek 29 ETEX 1: Modelový oblak po 60 hodinách od začátku experimentu (základní metoda výpočtu - MIX1, DSP1)



obrázek 30 ETEX 1 - trajektorie vypouštěné po 1 hodině po dobu činnosti zdroje
(všechny trajektorie jsou ukončeny po 60 hodinách od začátku experimentu)

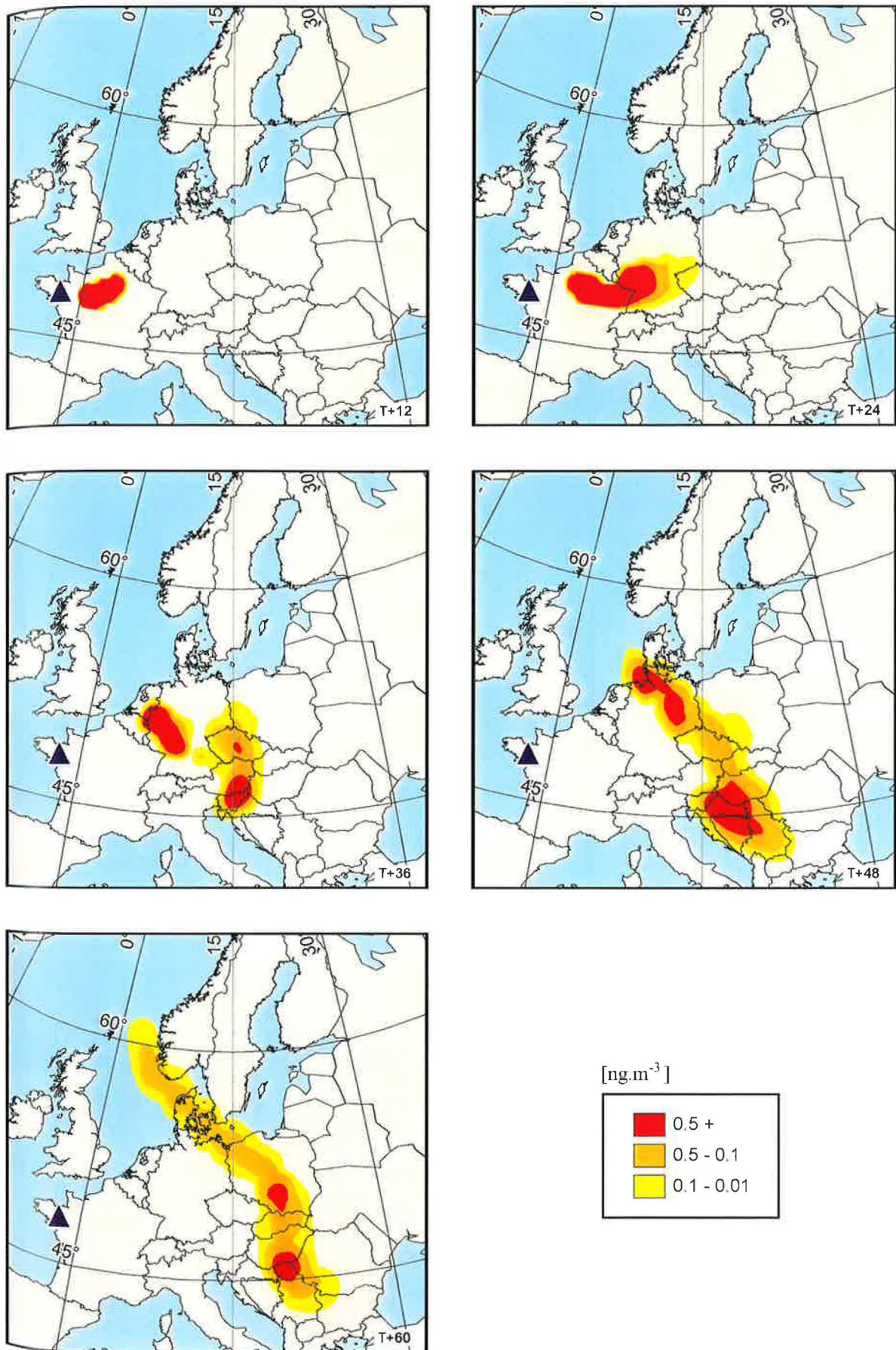
Jednotlivé metody výpočtu výšky směšovací vrstvy a parametrizace rozptylu nebyly vzájemně kombinovány, tj. pro testy postupu výpočtu směšovací vrstvy byla použita parametrizace rozptylu DSP1, a pro testy výpočtu rozptylových parametrů byla použita metoda stanovení směšovací výšky MIX1. Obrázky 27-29 zobrazují pohyb oblaku stopovací látky nad Evropou s využitím základních postupů obsažených v původním modelu (MIX1 + DSP1). Ve shodě s publikovanými měřeními hodnotami byly počítány tříhodinové průměrné koncentrace stopovací látky. Obrázek 30 ukazuje trajektorie vypouštěné každou hodinu ze zdroje po dobu jeho činnosti (tj. 12 hodin).

Na první pohled je zřejmé, že vypočtená poloha oblaku (obrázky 27-29) poměrně dobře odpovídá poloze měřené (obrázky 21-23). Obr. 30 dokumentuje skutečnost, že samotné trajektorie nejsou schopny poskytnout úplnou informaci o pohybu oblaku znečišťující látky v poli proudění. Všechny trajektorie vypouštěné po dobu aktivity zdroje směřují přes severní Francii a Německo do Skandinávie. Měřený oblak má ovšem dvě větve. První se přesouvala v souladu s vyobrazenými trajektoriemi k severu, druhá část se dostala do jihovýchodního proudění, které ji zaneslo nad Maďarsko a Balkán. Řada modelů (včetně původního modelu ČHMÚ) nebyla schopna reprodukovat obě tyto větve.

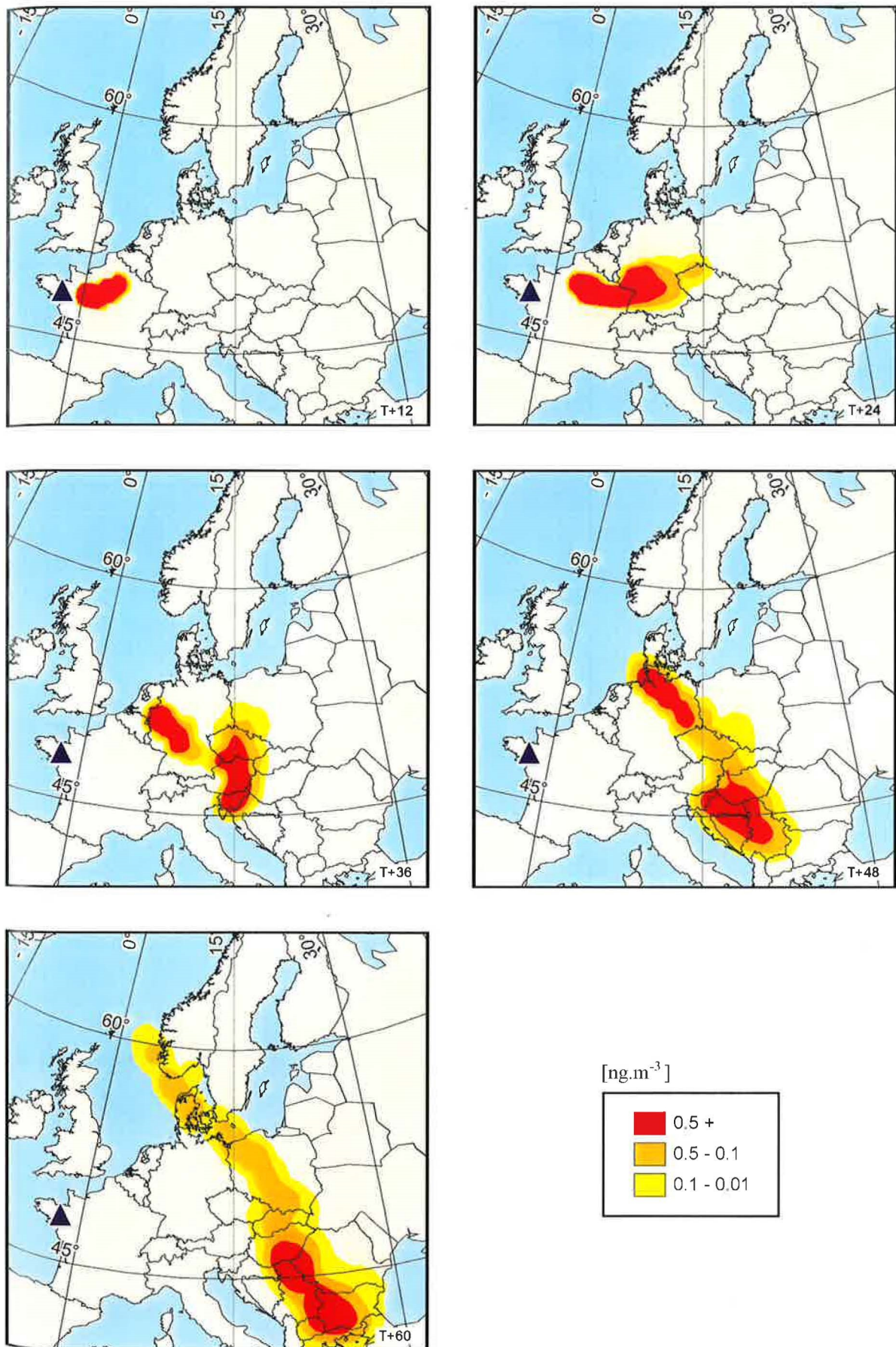
Zatímco prostorový přesun oblaku byl poměrně dobře modelem zachycen, vypočtené maximální hodnoty koncentrací jsou oproti měřeným vyšší (viz. dále).

Následující obrázky ukazují pohyb oblaku pro jednotlivé testované metody výpočtu výšky směšovací vrstvy (obr. 31 – MIX2, obr. 32 – MIX3, obr. 33 – MIX4) a rozptylových parametrů (obr. 34 – DSP1, obr. 35 – DSP2). Při pohledu na ně je zřejmé, že zcela selhala metoda používající konstantní výšku směšovací vrstvy, přestože byla řadou organizací v rámci experimentu ETEX poměrně úspěšně použita. Také použití jednoduchých rozptylových koeficientů definovaných v metodice SYMOS'97 se ukazuje jako nepříliš vhodné.

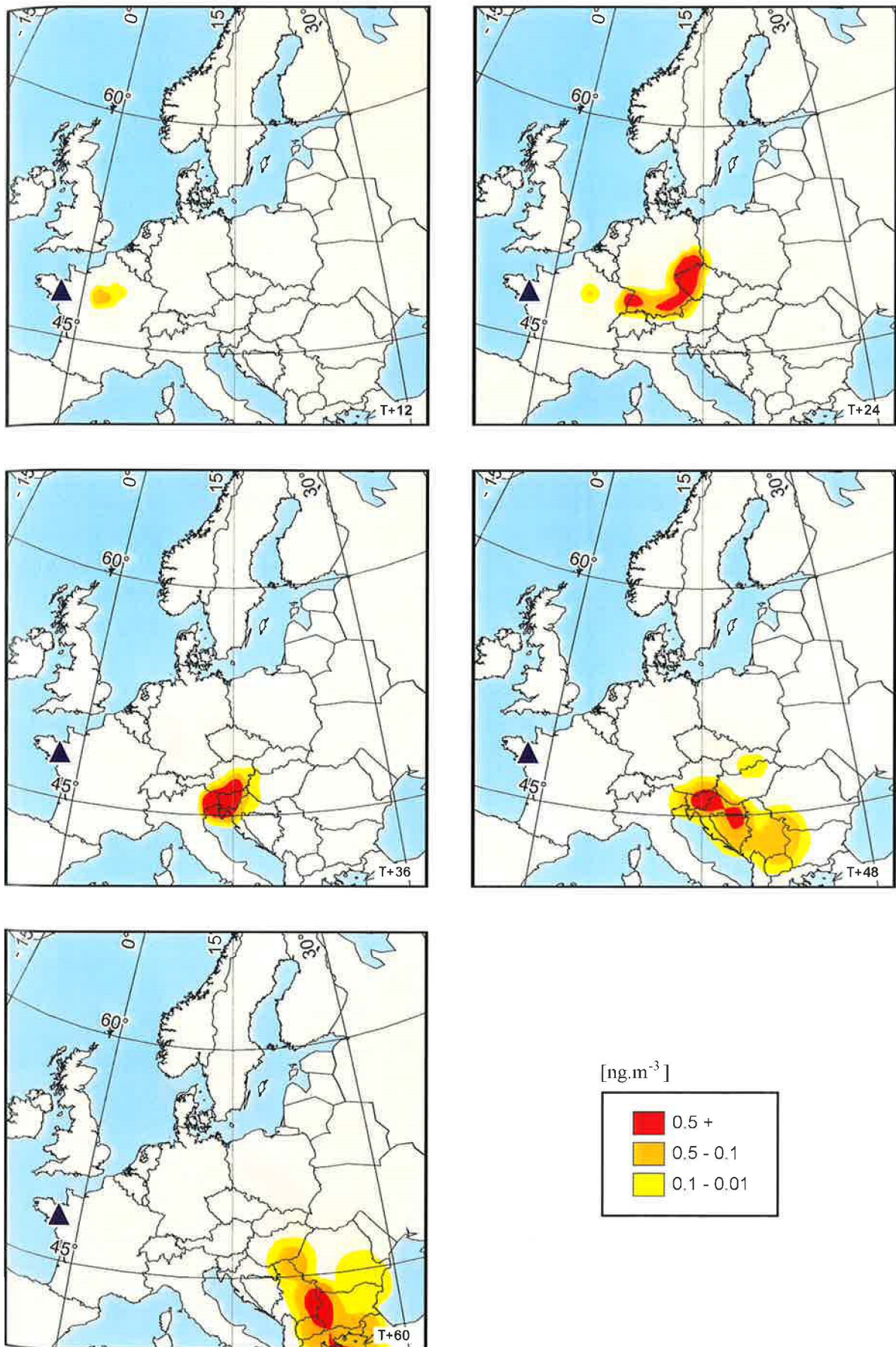
Všechny varianty modelového výpočtu byly porovnány s měřeními hodnotami (v obou případech se jedná o tříhodinové průměrné koncentrace). Měření stopovací látky v průběhu experimentu byla realizována na 168 měřicích lokalitách, umístěných vesměs na profesionálních meteorologických stanicích v jednotlivých státech. Přístroje, umístěné na stanicích, byly schopny pokrýt časový interval 60 hodin. Celková doba měření byla 90 hodin. Proto byly samplery uváděny do chodu postupně s několikahodinovým předstihem k očekávané době příchodu oblaku na stanici. Z tohoto důvodu (a také díky výpadku některých stanic, a dalším problémům technického rázu) nebylo nikdy možno provést porovnání na všech 168 stanicích najednou. Přesto se dodaný soubor jeví jako dostatečný pro statistickou analýzu.



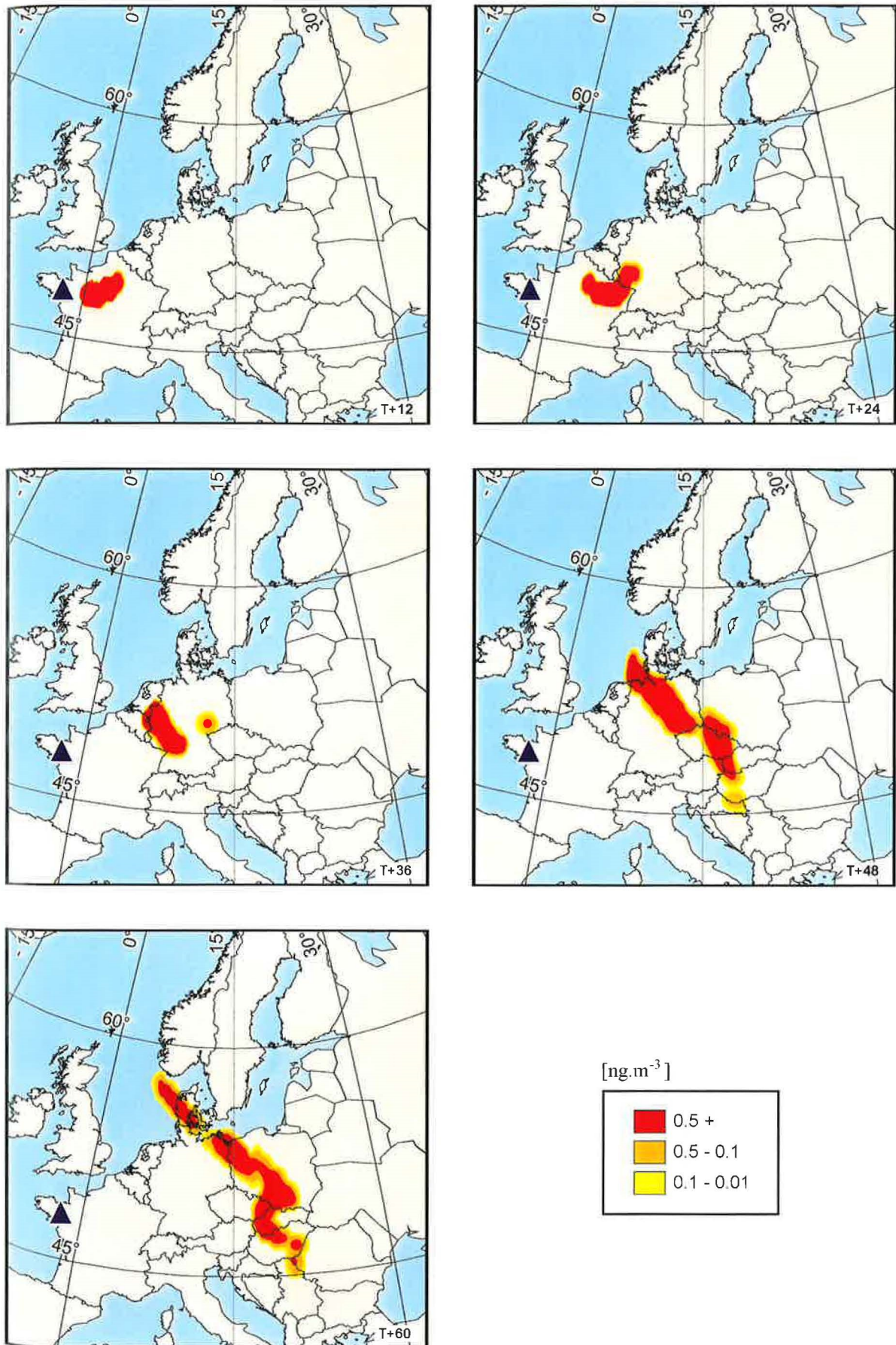
obrázek 31 ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu - MIX2)



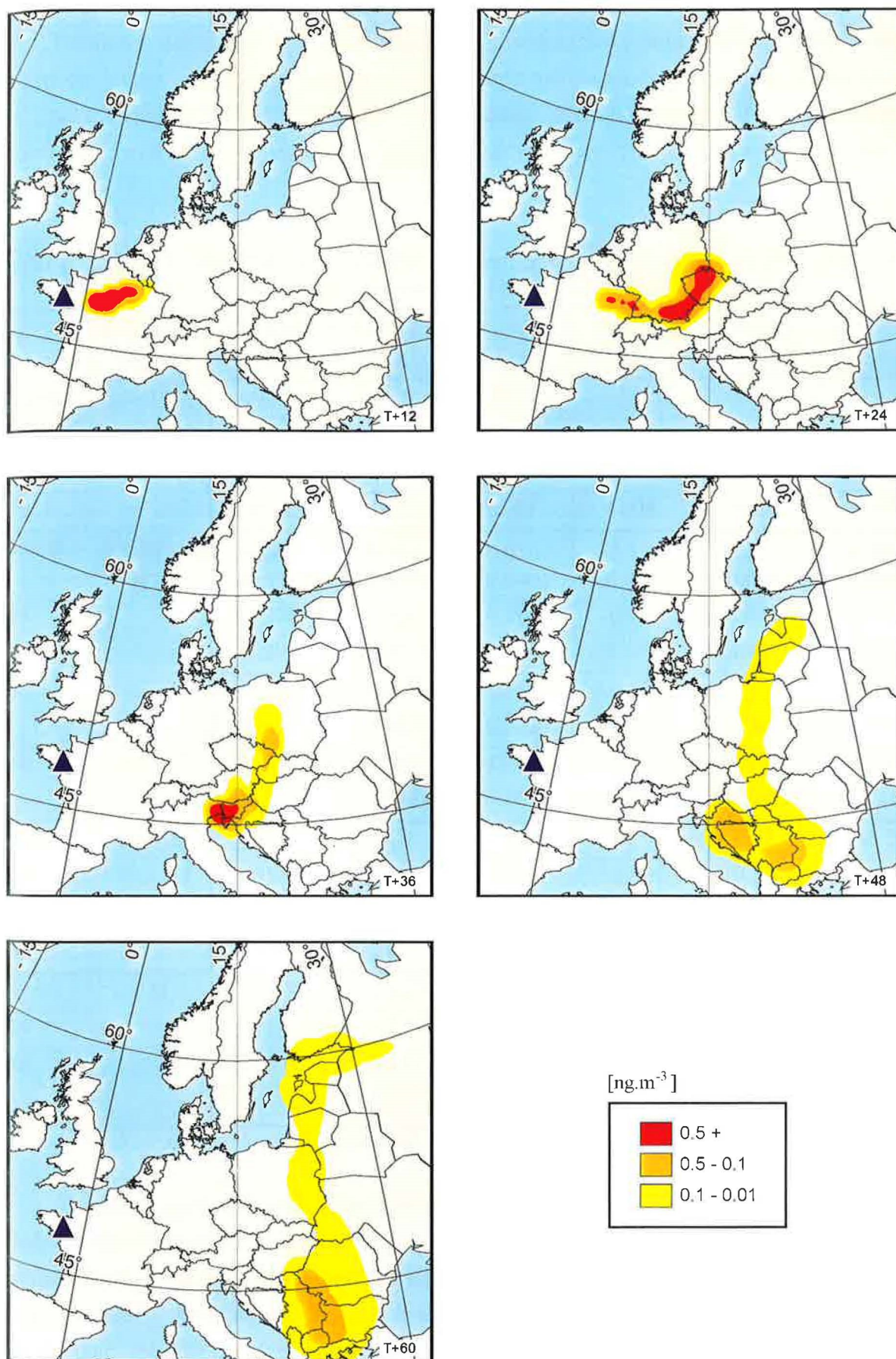
obrázek 32 ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu - MIX3)



obrázek 33 ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu - MIX4)



obrázek 34 ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu - DSP2)



obrázek 35 ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu - DSP3)

Tabulka 3 sumarizuje vypočtené statistické charakteristiky jednotlivých variant modelu. Pro výpočet těchto hodnot byla použita všechna platná měření na dané stanici ve všech časech, resp. pouze v čase T+24, T+48 a T+60. Tyto hodnoty ukazují celkovou shodu vypočtených koncentrací s měřeními. Dodatečnou informaci dávají rozptylové diagramy vynesené na obrázcích 36-39.

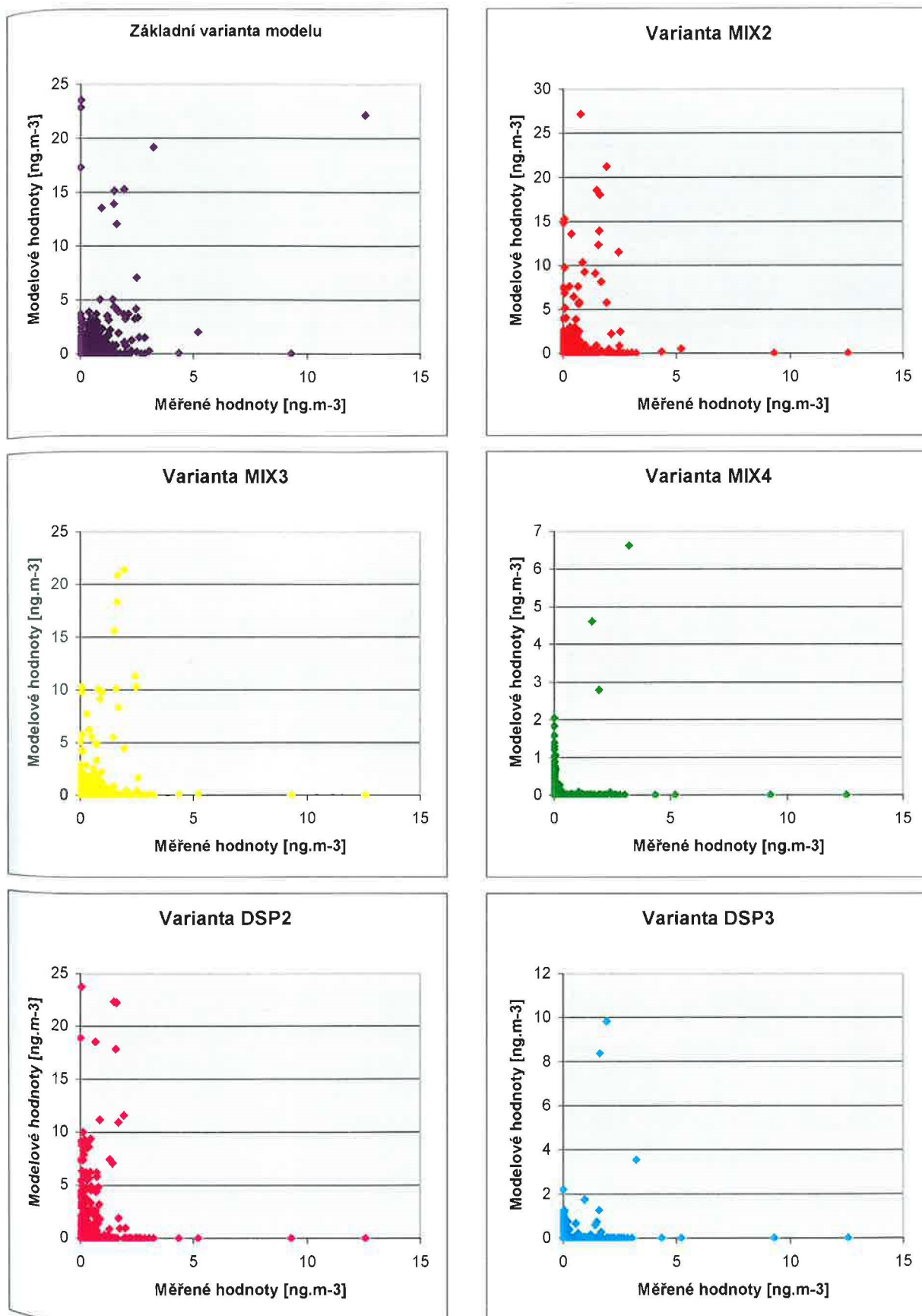
tabulka 3 ETEX I: Statistické charakteristiky jednotlivých modelů vypočtené pro naměřené a modelové tříhodinové průměrné koncentrace na jednotlivých stanicích

Data	Statistická veličina	Základní varianta	Varianta MIX2	Varianta MIX3	Varianta MIX4	Varianta DSP2	Varianta DSP3
Celková	Korelační koeficient*	0.44	0.29	0.33	0.12	0.24	0.13
T+24		0.17	0.15	0.15	-0.05	0.12	-0.04
T+48		0.39	0.25	0.27	-0.07	0.20	-0.06
T+60		0.11	0.09	0.07	-0.04	0.08	-0.05
Celková	Vychýlení (B_{95})	0.109 (0.051)	0.074 (0.059)	0.056 (0.049)	-0.103 (0.022)	0.131 (0.066)	-0.097 (0.024)
T+24		0.278 (0.293)	0.338 (0.352)	0.206 (0.224)	-0.048 (0.071)	0.307 (0.469)	-0.042 (0.070)
T+48		-0.041 (0.075)	-0.083 (0.082)	-0.071 (0.083)	-0.167 (0.076)	0.219 (0.287)	-0.176 (0.074)
T+60		0.035 (0.106)	-0.063 (0.082)	-0.045 (0.089)	-0.109 (0.081)	0.036 (0.133)	-0.124 (0.078)
Celková	NMSE	49.2	64.4	57.6	96.7	63.1	86.5
T+24		85.8	97.4	62.6	42.7	102.3	37.0
T+48		7.3	12.9	11.5	94.3	27.2	182.5
T+60		17.9	28.7	25.6	112.6	28.0	270.2
Celková	FM	22.5	18.2	14.0	2.8	11.3	4.5
T+24		11.5	7.3	8.8	1.3	8.6	2.7
T+48		29.0	18.8	19.2	0.1	10.4	0.5
T+60		17.3	17.7	17.2	0.4	11.8	0.0

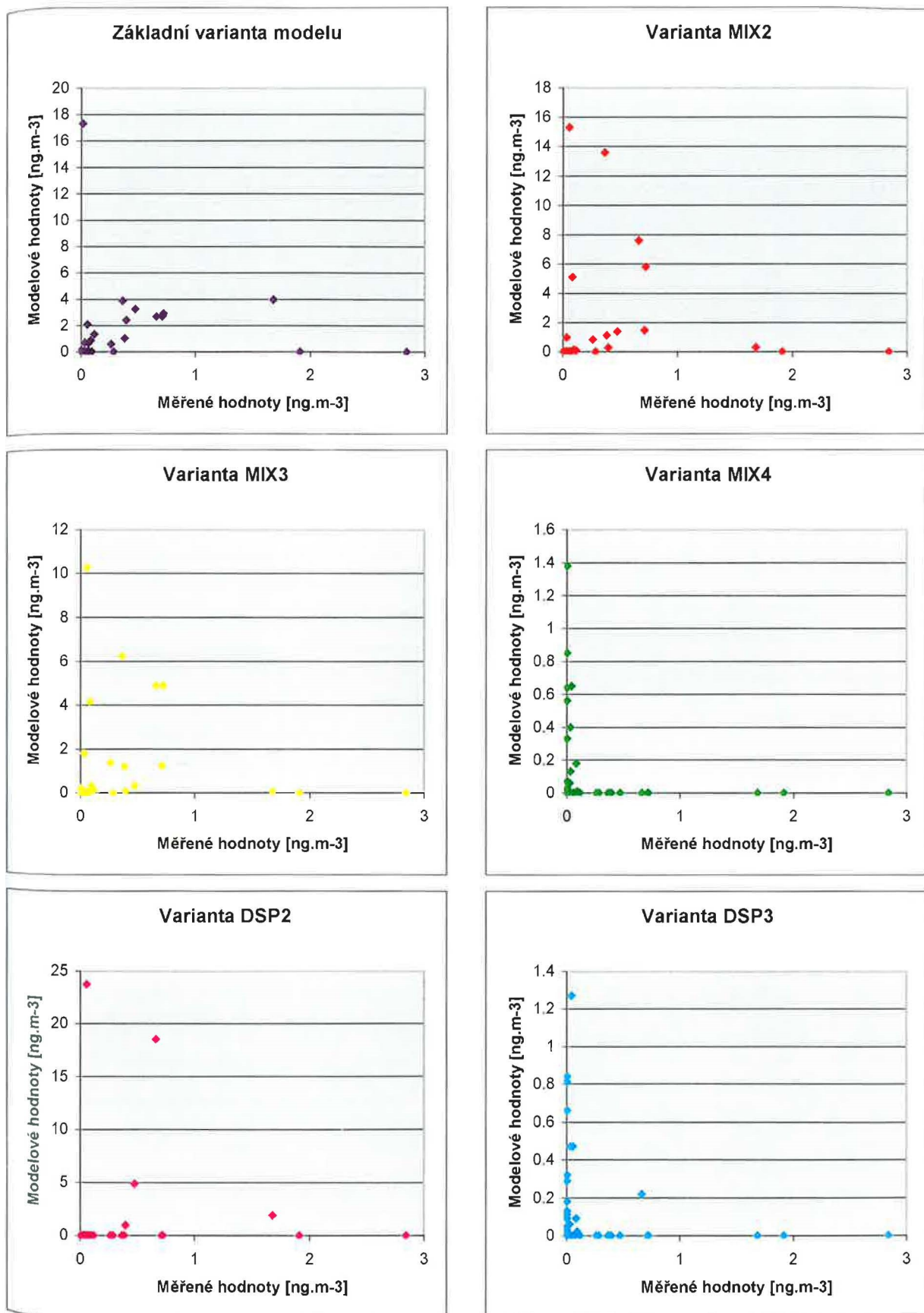
korelační koeficienty jsou statisticky významné

Z těchto hodnot je zřejmé, že nejlepší shoda celkových charakteristik je vykazována pro základní variantu modelu. Na druhé straně varianty MIX4 a DSP3, které pracují pouze s jednoduchými parametrizacemi atmosférických procesů zcela selhaly. Z hlediska časového vývoje je možno konstatovat, že pro kratší časový interval model ve všech variantách nadhodnocuje, zatímco pro delší časové úseky má tendenci hodnoty spíše podhodnocovat. To je zřejmé i z obrázků 27-35, které zobrazují pohyb oblaku nad Evropou.

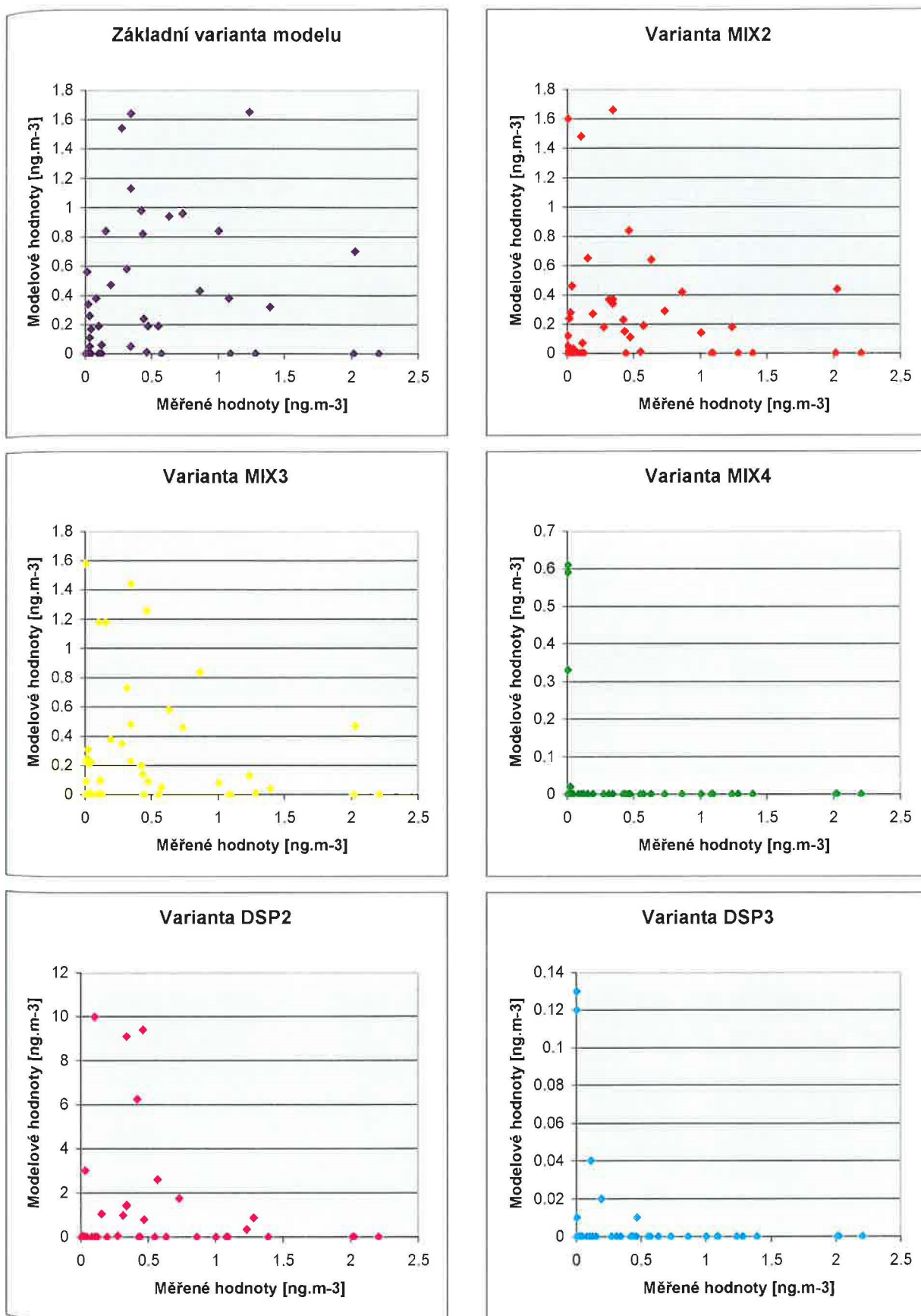
obrázek 36 Rozptylový diagram zpracovaný pro všechna platná měření v jednotlivých variantách modelu



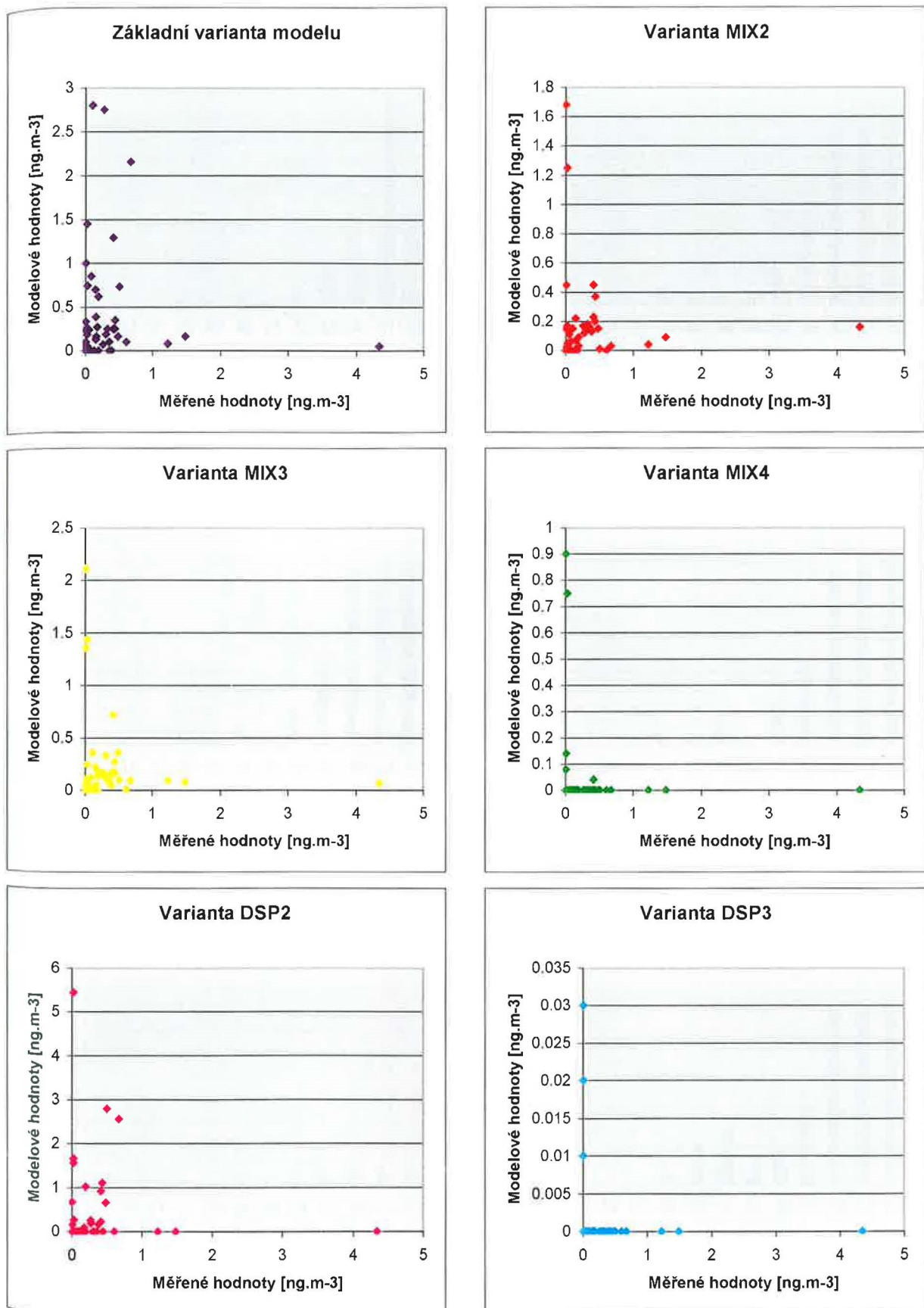
obrázek 37 Rozptylový diagram zpracovaný pro platná měření v čase $T+24$ pro jednotlivé varianty modelu



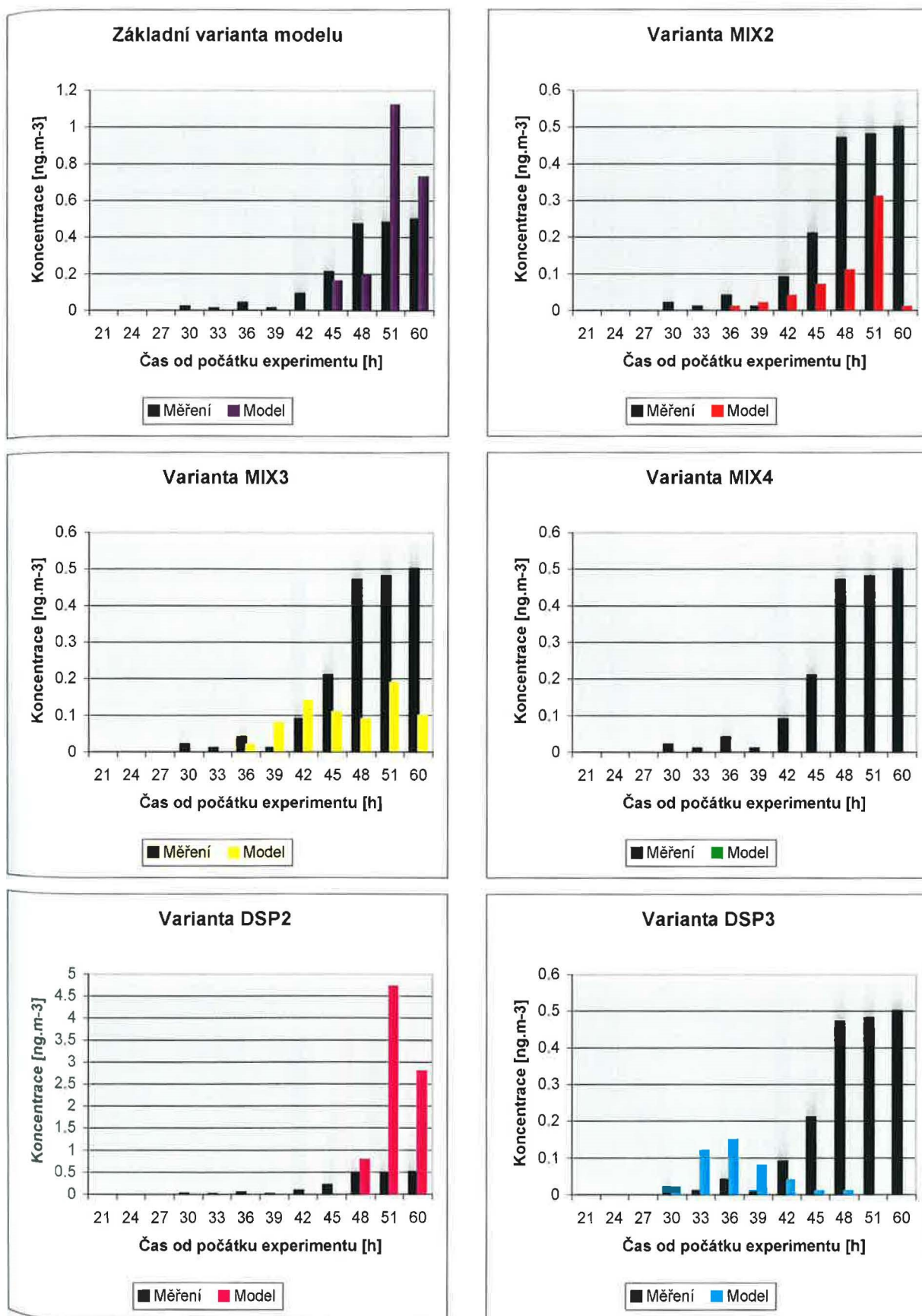
obrázek 38 Rozptylový diagram zpracovaný pro platná měření v čase $T+48$ pro jednotlivé varianty modelu



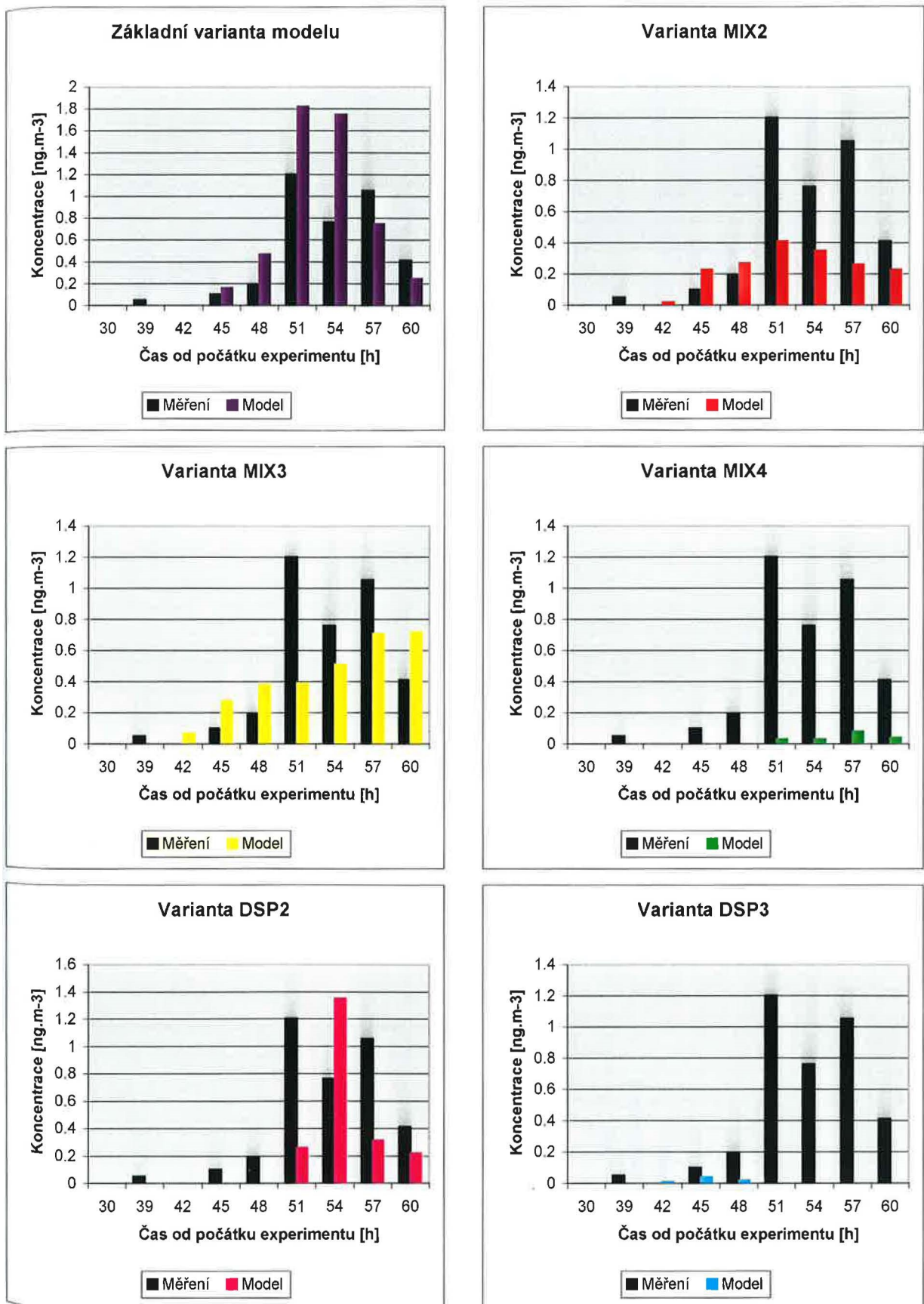
obrázek 39 Rozptylový diagram zpracovaný pro platná měření v čase $T+60$ pro jednotlivé varianty modelu



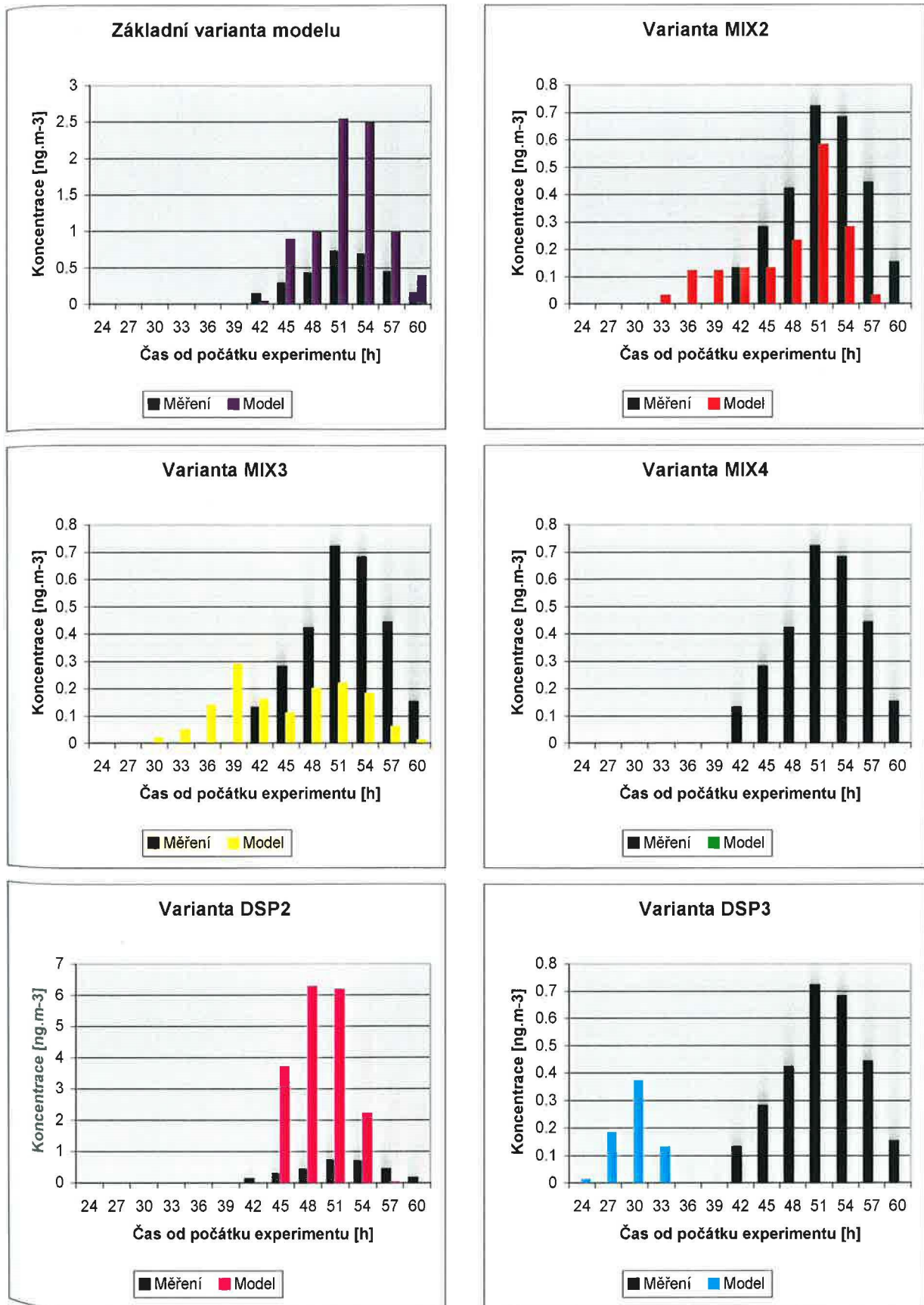
obrázek 40 Porovnání měřených a modelových tříhodinových průměrných koncentrací na stanici CR01 – Červená



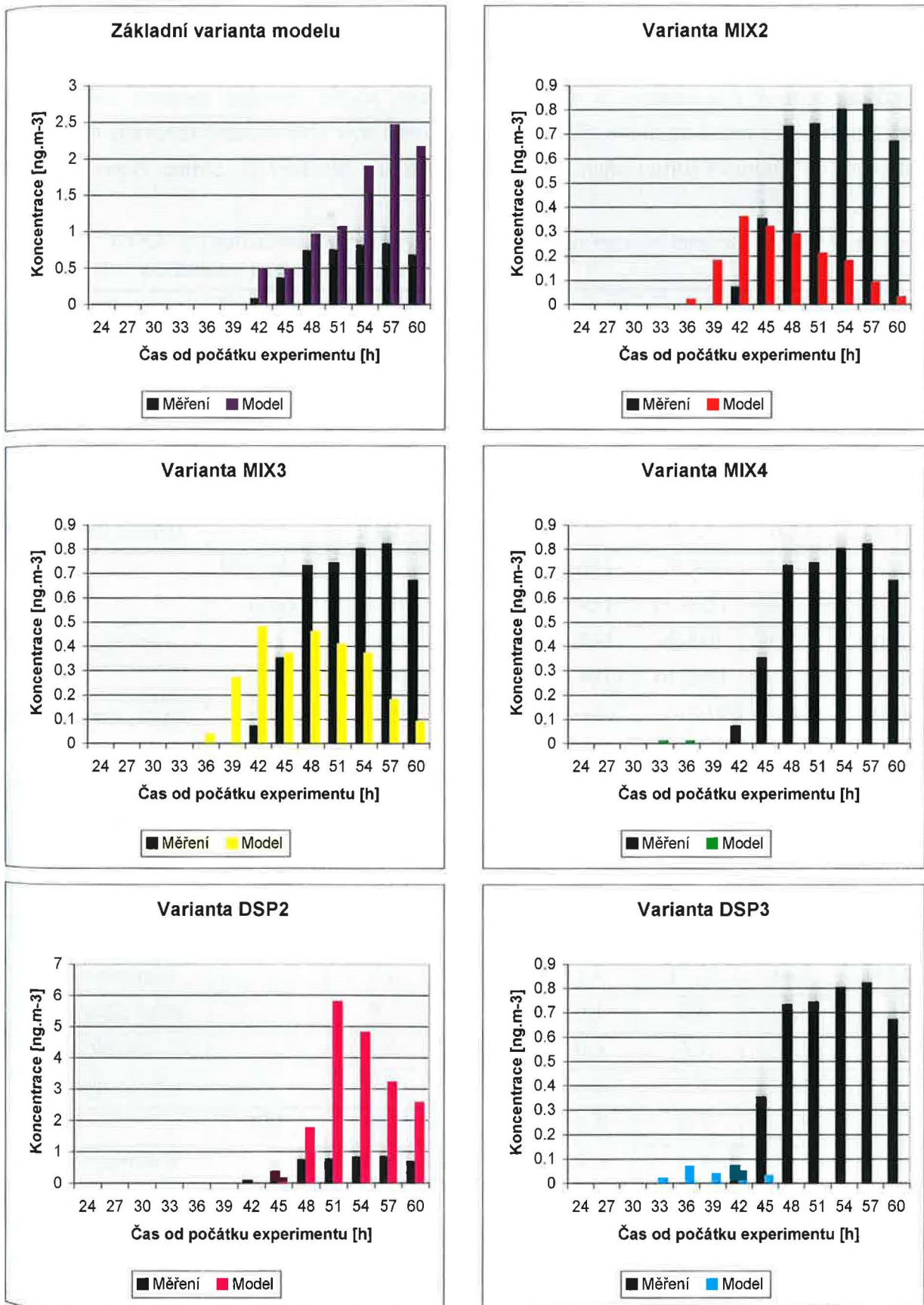
obrázek 41 Porovnání měřených a modelových tříhodinových průměrných koncentrací na stanici H01 – Nagykanizsa



obrázek 42 Porovnání měřených a modelových tříhodinových průměrných koncentrací na stanici PL03 – Klodzko



obrázek 43 Porovnání měřených a modelových tříhodinových průměrných koncentrací na stanici SR01 – Jaslovské Bohunice



Z hlediska využití tohoto typu modelů pro výpočet pohybu oblaku znečišťující látky v případě havárie jsou zajímavější informace o schopnosti modelu předpovědět celkovou dávku na dané lokalitě, maximální koncentraci (c_{max}), době příchodu oblaku nad dané místo atd. Tyto hodnoty jsou důležité pro rozhodování o opatřeních na ochranu obyvatelstva. Obrázky 40-43 ukazují pro ilustraci časovou shodu průběhu měřených a modelových hodnot na čtyřech vybraných stanicích (stanice byly vybrány tak, aby zachytily oblak na konci výpočetního času). Z grafů je opět patrné, že výsledky variant MIX4 a DSP3 nejsou příliš kvalitní. Ve zbývajících

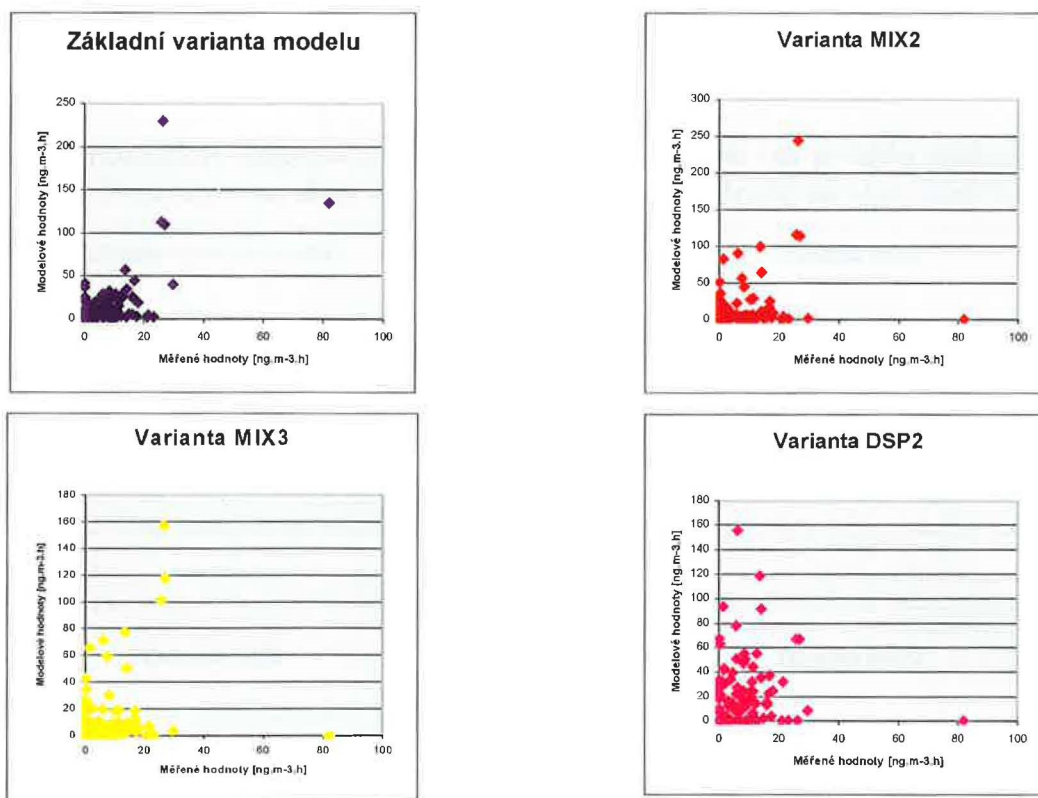
tabulka 4 ETEX 1: Statistické charakteristiky jednotlivých variant modelu vypočtené pro dané parametry experimentálních výsledků

Parametr	Statistická veličina	Základní varianta	Varianta MIX2	Varianta MIX3	Varianta MIX4	Varianta DSP2	Varianta DSP3
Dávka	Korelační koeficient*	0.65	0.31	0.41	0.09	0.22	0.18
Max. koncentrace		0.66	0.44	0.44	0.04	0.29	0.12
Příchod max. konc.		0.65	0.61	0.70	0.07	0.19	0.01
Příchod oblaku		0.68	0.55	0.55	0.01	0.00	0.05
Přítomnost oblaku		0.62	0.55	0.55	0.03	0.53	0.16
Dávka	Vychýlení ($B_{0.95}$)	5.721 (3.071)	4.576 (3.817)	3.683 (2.951)	-3.701 (1.395)	6.493 (3.028)	-3.416 (1.419)
Max. koncentrace		0.665 (0.389)	0.654 (0.557)	0.562 (0.481)	-0.488 (0.226)	1.770 (0.725)	-0.435 (0.232)
Příchod max. konc.		-3.573 (2.662)	-6.327 (3.107)	-3.927 (2.684)	-29.918 (3.828)	-9.573 (4.740)	-28.309 (3.577)
Příchod oblaku		0.057 (2.429)	-2.371 (3.213)	-2.857 (3.188)	-25.914 (3.654)	-5.571 (5.103)	-23.686 (3.632)
Přítomnost oblaku		-1.804 (1.192)	-2.089 (1.329)	-1.786 (1.352)	-7.893 (1.627)	-4.625 (1.267)	-6.768 (1.557)
Dávka	NMSE	8.9	14.8	9.8	20.0	10.3	15.8
Max. koncentrace		7.2	14.3	11.4	17.3	14.7	14.0
Příchod max. konc.		0.1	0.2	0.1	2.8	0.8	2.2
Příchod oblaku		0.1	0.3	0.3	4.1	1.1	2.8
Přítomnost oblaku		0.8	1.0	1.0	7.4	3.1	4.3
Dávka	FM	30.4	28.8	21.4	6.7	18.8	10.7
Max. koncentrace		30.5	27.6	19.0	6.8	23.3	12.3
Příchod max. konc.		81.7	76.2	79.5	25.6	50.8	30.4
Příchod oblaku		79.8	69.5	69.7	20.3	42.8	27.2
Přítomnost oblaku		54.6	49.1	48.8	11.4	27.7	19.7

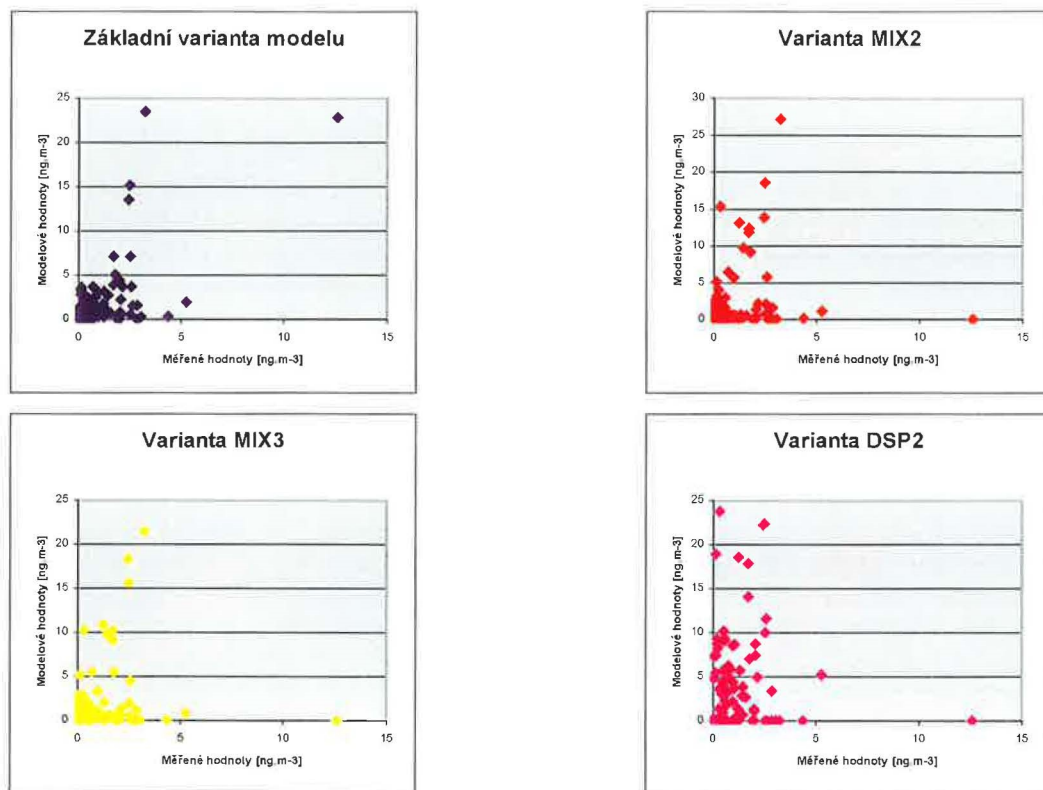
variantách je model poměrně dobře schopen reprodukovat dobu trvání přítomnosti oblaku nad měřicí stanicí a dobu jeho příchodu. Předpověď maximálních koncentrací je již úspěšná méně.

Tabulka 4 sumarizuje tyto informace pro všechny měřicí stanice s platnými měřeními. Vzhledem k malé úspěšnosti variant MIX4 a DSP3 se jimi již nebudeme dále zabývat. Celkovou dávku na měřicí stanici (za 60 hodin) je model nejlépe schopen reprodukovat v základní variantě, byť je poněkud nadhodnocena (rozptylový diagram viz. obr. 44). Ve všech uvažovaných variantách (základní, MIX2, MIX3, DSP2) je celková dávka poněkud nadhodnocena i přesto, že dobu trvání přítomnosti oblaku nad danou lokalitou model spíše podhodnocuje s poměrně velkým rozptylem měřených a modelových hodnot (obr. 48). Vyšší hodnota celkové dávky je důsledek vyšších vypočtených koncentrací v jednotlivých variantách (viz. obr. 36). Doba příchodu oblaku na měřicí stanici je předpovězena s poměrně velkou úspěšností pro základní variantu a varianty MIX2 a MIX3 (obr. 47), doba výskytu maximální koncentrace je stanovena méně kvalitně (obr. 46).

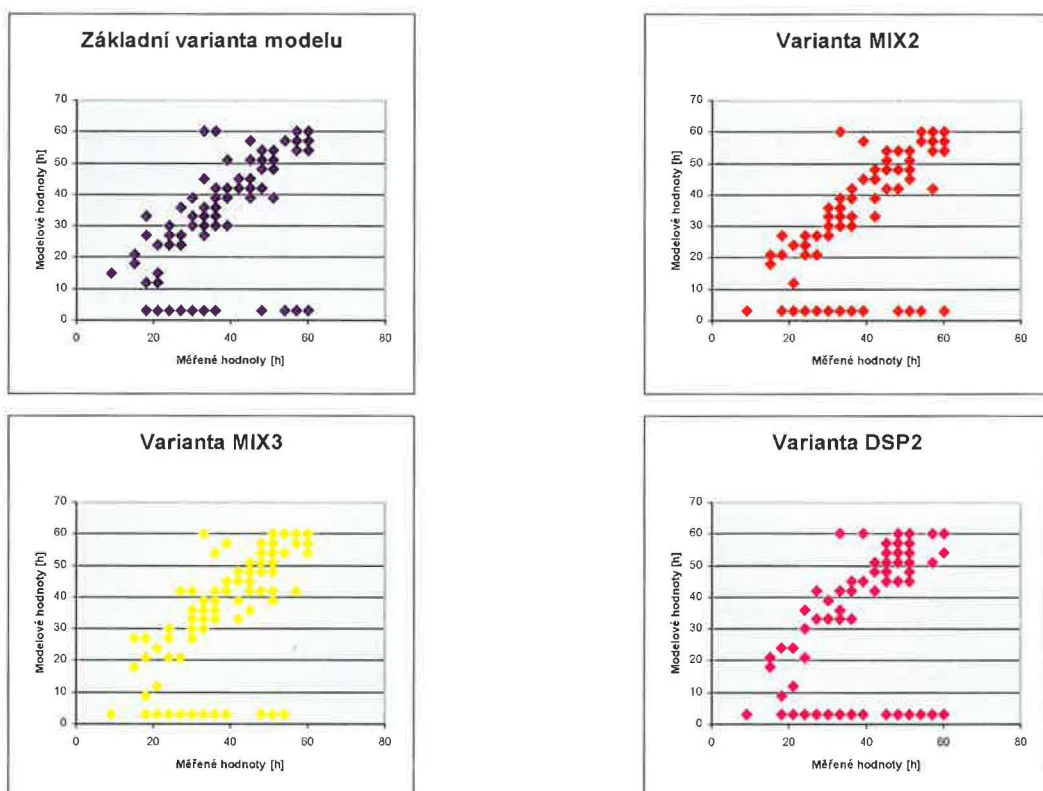
obrázek 44 Rozptylový diagram zpracovaný pro celkovou (60-ti hodinovou) dávku na jednotlivých stanicích (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu)



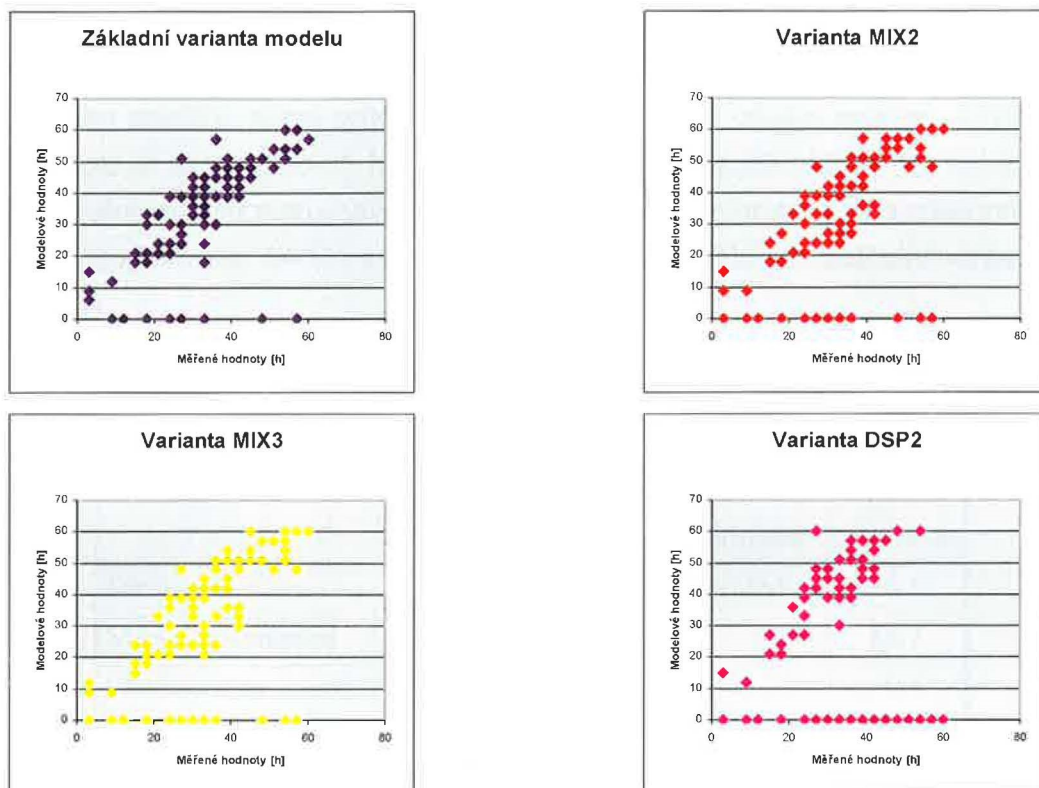
obrázek 45 Rozptylový diagram zpracovaný pro maximální koncentraci na dané stanici (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu)



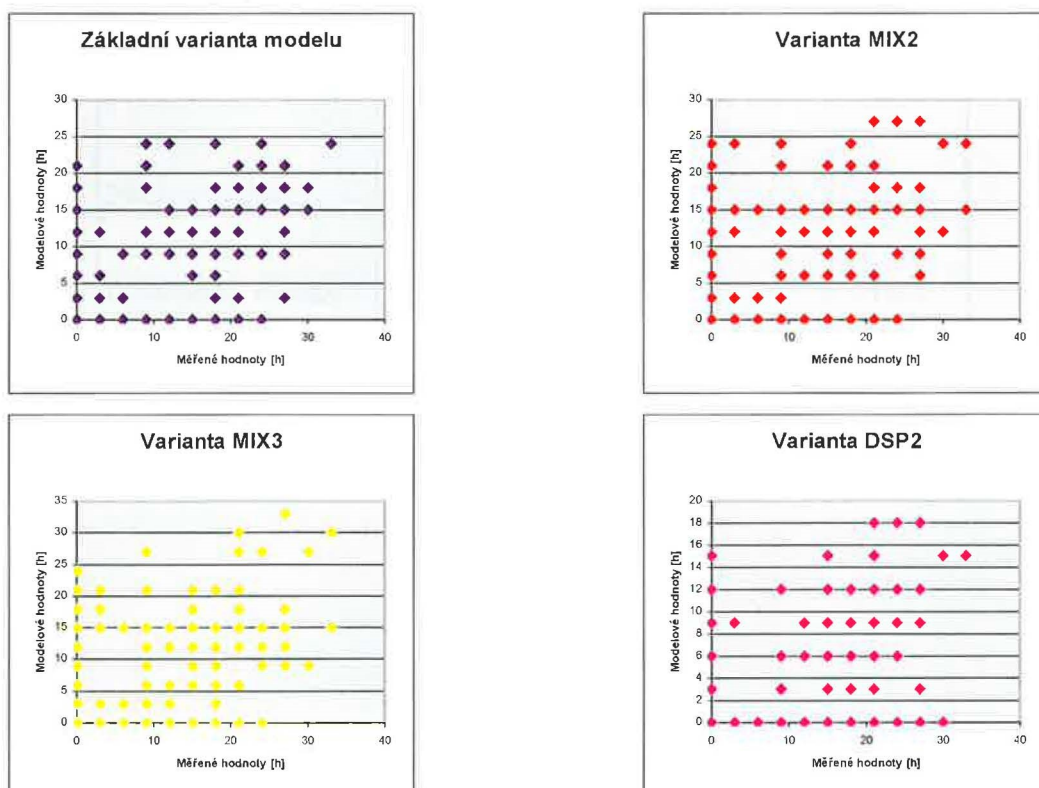
obrázek 46 Rozptylový diagram zpracovaný pro dobu výskytu (od počátku úniku) maximální koncentraci na dané stanici (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu)



obrázek 47 Rozptylový diagram zpracovaný pro dobu příchodu oblaku na danou stanici (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu)



obrázek 48 Rozptylový diagram zpracovaný pro dobu přítomnosti oblaku nad danou stanici (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu)

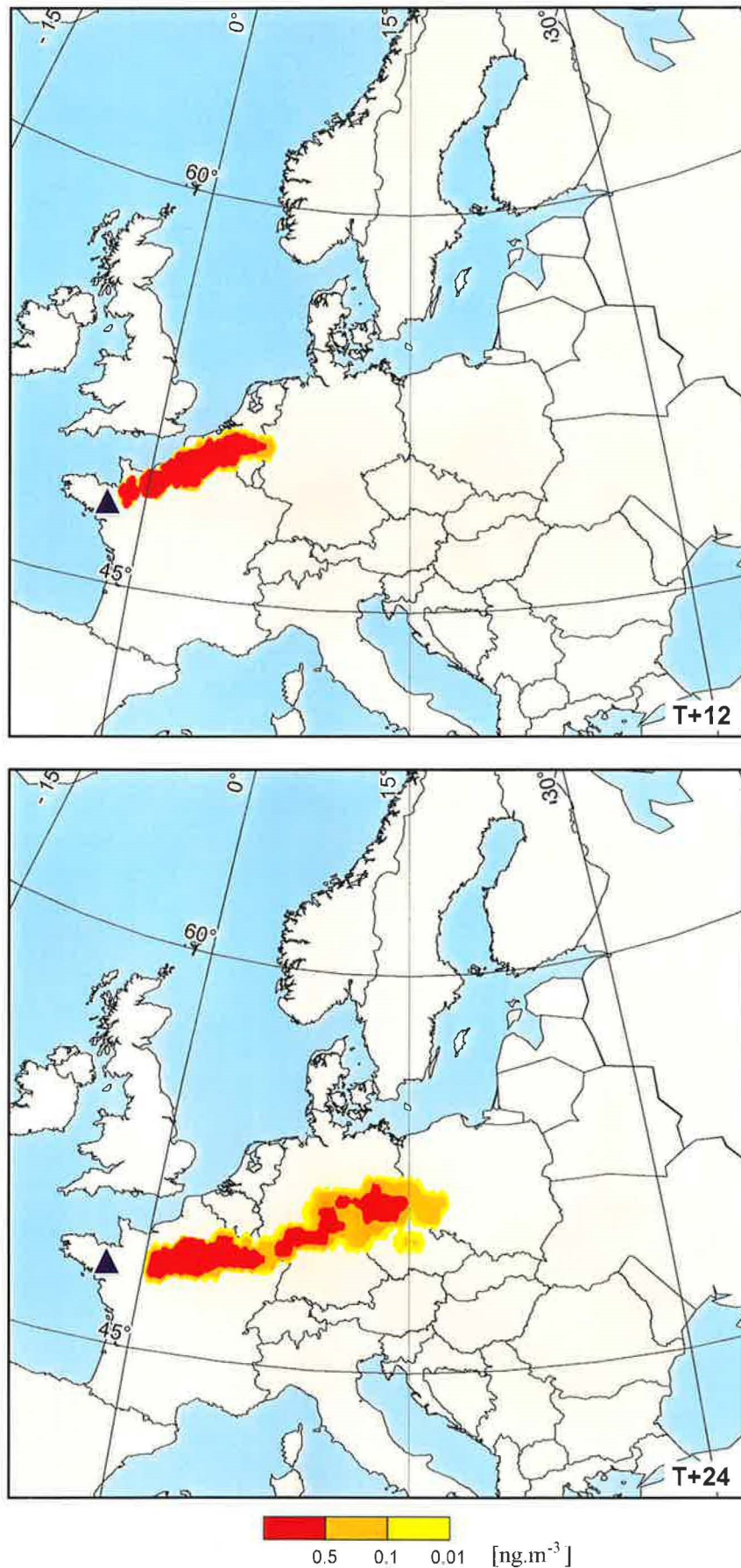


6.5.2. ETEX 2

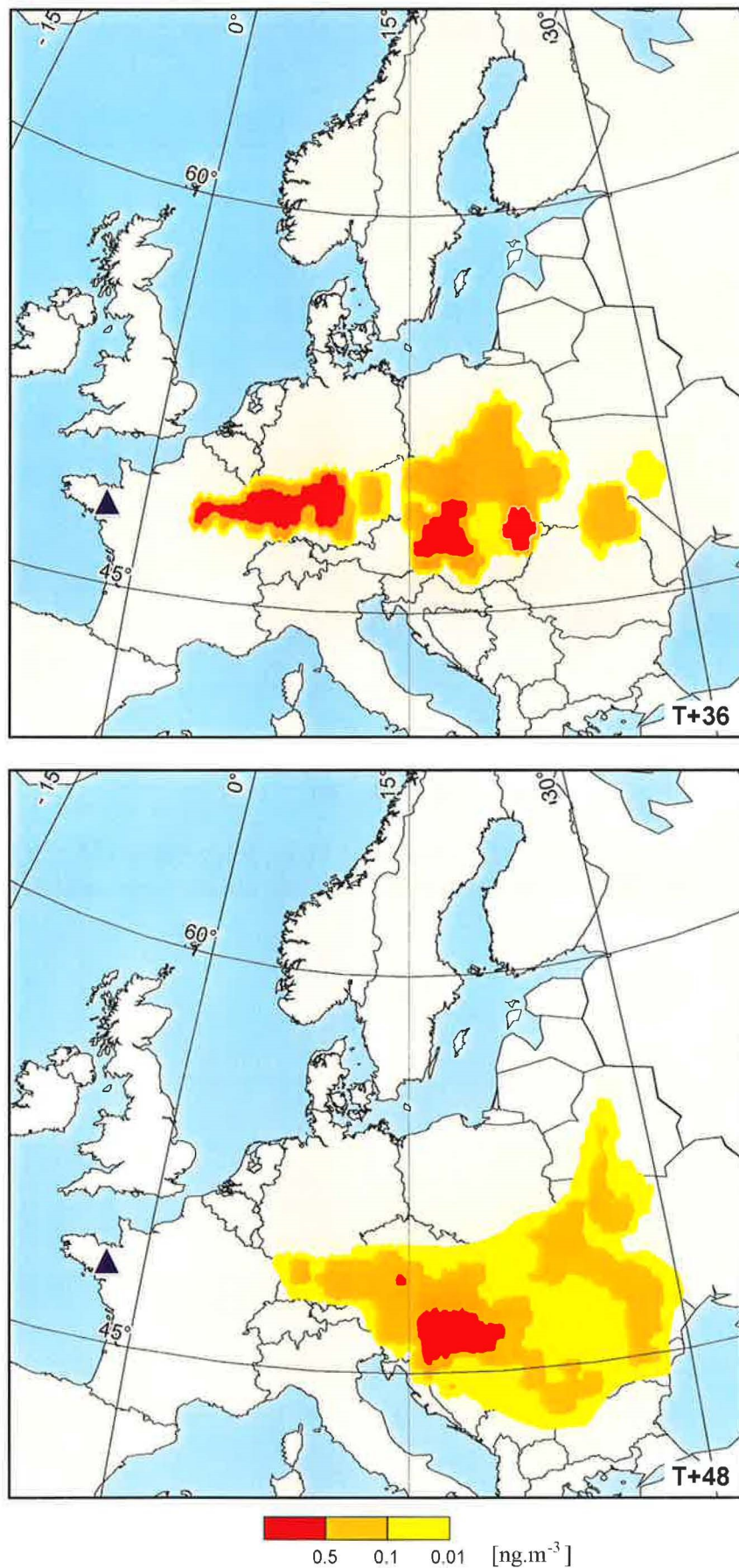
Druhý experiment v rámci ETEXu byl celkově mnohem problematictější než první a to zejména z důvodu problematictější meteorologické situace (viz. výše). V podstatě žádný model při experimentu použitý, nebyl schopen reprodukovat pohyb oblaku správně. Zejména druhé maximum, které se ukázalo po 36 hodinách opět na Francii je jen obtížně vysvětlitelné. Tomu odpovídá i kvalita zde prezentovaných výsledků. Omezíme se proto jen na znázornění pohybu oblaku nad Evropou (obr. 49-51) a přehled statistických veličin pro základní variantu modelu (viz. tabulka 5).

tabulka 5 ETEX 2: Statistické charakteristiky základní varianty modelu pro dané parametry experimentálních výsledků

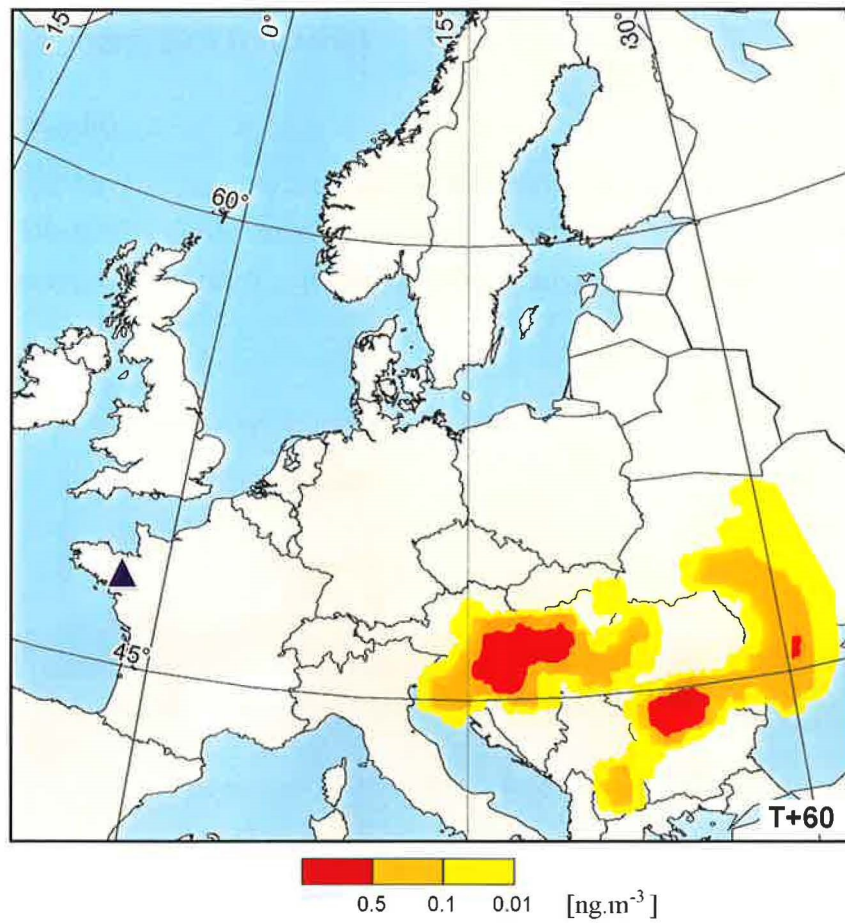
Parametr	Statistická veličina	Základní varianta	Statistická veličina	Základní varianta
Dávka	Korelační koeficient*	0.56	NMSE	136.8
Max. koncentrace		0.68		85.3
Příchod max. konc.		-0.01		0.8
Příchod oblaku		0.06		0.8
Přítomnost oblaku		0.17		10.0
Dávka	Vychýlení ($B_{0.95}$)	6.209 (2.308)	FM	3.7
Max. koncentrace		1.298 (0.554)		4.9
Příchod max. konc.		-9.636 (5.468)		50.7
Příchod oblaku		-8.417 (6.284)		56.4
Přítomnost oblaku		5.732 (1.451)		14.4



obrázek 49 ETEX 2: Modelový oblak po 12 (nahore), resp. po 24 hodinách (dole) od začátku experimentu (základní metoda výpočtu - MIXI, DSP1)



obrázek 50 ETEX 2: Modelový oblak po 36 (nahore), resp. po 48 hodinách (dole) od začátku experimentu (základní metoda výpočtu - MIX1, DSP1)



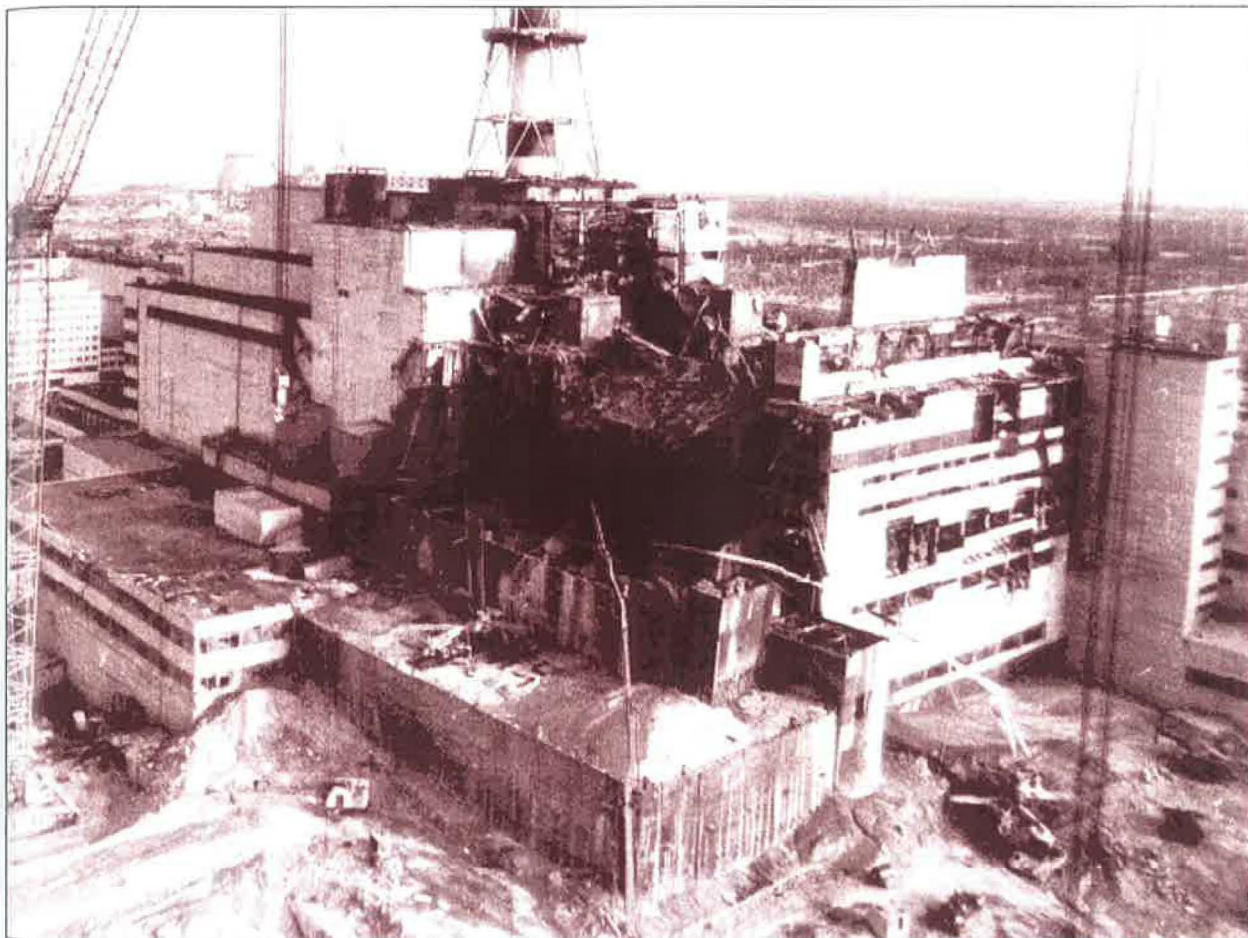
obrázek 51 ETEX 2: Modelový oblak po 60 hodinách
od začátku experimentu (základní metoda výpočtu - MIX1, DSP1)

7. ATMES (ČERNOBYLSKÁ HAVÁRIE)

7.1. Pozadí studie

Nejzávažnější havárie na provozu jaderné elektrárny se odehrála večer 25. dubna 1986 v Černobyli na Ukrajině. Došlo zde ke dvěma výbuchům, jejichž následkem byl únik radioaktivních materiálů do ovzduší a jejich následný transport v ovzduší na vzdálenosti tisíce kilometrů.

obrázek 52 Blok 4 černobylského reaktoru po havárii



Jedním z důsledků této havárie bylo i rozhodnutí Mezinárodní agentury pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency – IAEA), ve spolupráci se Světovou meteorologickou organizací (World Meteorological Organization – WMO), otestovat a okalibrovat modely dálkového transportu radioaktivních materiálů v atmosféře. Výsledkem této spolupráce byla studie ATMES (Atmospheric Transport Evaluation Study), která byla iniciována v listopadu 1986 ve Vídni.

Ve spolupráci mnoha odborných organizací ve světě byla vytvořena rozsáhlá databáze měření radioaktivity v období následujícím po černobylské havárii, dále byly shromážděny

meteorologické údaje. Emisní člen odhadl Dr. V.N.Petrov a poskytl je do společné databáze. Tato data byla následně distribuována do jednotlivých institucí, které na jejich základě provedly modelové výpočty transportu a rozptylu radioaktivních materiálů v atmosféře. Výsledky byly následovně zaslány do JRC/Ispira (Joint Research Center EU), kde byly vyhodnoceny a porovnány jednak s ostatními modely, jednak s měřenými daty.

Tato studie byla důležitým impulsem při rozvoji modelů dálkového transportu znečištění. Přes její relativní úspěšnost zde zůstávají otevřené otázky, které ztěžují vyhodnocení modelových výpočtů. Jedná se především o nejistoty při stanovení emisního členu, tj. o vyhodnocení skutečného průběhu a množství radioaktivního materiálu uvolněného do atmosféry.

7.2. Databáze studie

7.2.1. Emise ze zdroje

Pro uspokojivé použití modelů transportu a rozptylu znečišťujících látek jsou obecně třeba následující údaje:

- přesná poloha zdroje
- typ emitovaných látek
- množství emitovaných látek
- časové změny v emisním členu
- efektivní výšku zdroje

První informace o havárii v Černobylu byly uvolněny na zasedání expertů IAEA 25.-29.dubna 1986 ve Vídni. Zahrnovaly odhady celkového uvolněného množství jednotlivých radionuklidů. Tyto předběžné údaje byly upřesněny 6.května 1986, kdy byl reaktor uzavřen. Na

tabulka 6 Emise při havárii na Černobylském reaktoru

Datum	Cs-137 [Tbq/den]	I-131 [Tbq/den]	Efektivní výška středu vlečky [m]
26.4.	$2,2 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^5$	600 ^{*)}
27.4.	$7,0 \cdot 10^3$	$5,5 \cdot 10^4$	600
28.4.	$5,5 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^4$	300
29.4.	$4,1 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^4$	300
30.4.	$3,0 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^4$	300
1.5.	$3,0 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	300
2.5.	$5,5 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^4$	300
3.5.	$6,3 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^4$	300
4.5.	$8,1 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^4$	300
5.5.	$8,9 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^4$	300
6.5.	$1,1 \cdot 10^2$	$7,4 \cdot 10^2$	300

^{*)} Toto číslo zahrnuje počáteční explozi; předpokládá se, že 20% celkové aktivity prvního dne bylo emitováno během prvních 6-ti hodin ve výšce 1500 m.

prvním zasedání řídicího výboru ATMES byly předány informace o denních emisích Cs-137 a I-131 společně s odhadem efektivní výšky zdroje. Toto upřesnění bylo založeno na radiologických informacích v okolí reaktoru a na modelu depozice radionuklidů.

7.2.2. Meteorologické údaje

Pro dobrou simulaci transportu a rozptylu znečištění v ovzduší je vyžadováno 3-rozměrná data o proudění, turbulenci, teplotě a dále informace o srážkách na zájmové oblasti. Ve světě je k dispozici mnoho různých zdrojů meteorologických dat: jednak to jsou data získaná z pozorování a jednak údaje zpracované pomocí meteorologických modelů (analýza, předpověď). Rozdílné modely vzhledem k odlišným metodám zpracování poskytují rozdílné výsledky. Tyto diference jsou pak jedním ze zdrojů rozdílů mezi modelovými výsledky. K vyloučení tohoto efektu byly všem účastníkům studie poskytnuty jednotná meteorologická pole zpracovaná v ECMWF (European Centre for Medium Weather Forecasts). Informace o srážkách byly stanoveny na základě objektivní analýzy měřených údajů v KNMI (the Royal Meteorological Institute of the Netherlands). Meteorologická databáze pokrývá území rozkládající se od 11° západní délky po 40,5° východní délky a od 29,25° severní šířky až po severní pól. Období pokryté meteorologickými údaji začíná 25.dubna 1986 ve 12:00 UTC a končí 10.května 1986 v 18:00 UTC. Časové rozlišení těchto dat je 6 hodin. K dispozici jsou dvě sady dat:

1. 9 modelových hladin nejbližších k povrchu (přibližně do 500 hPa)
2. stejné údaje ovšem na 4 standardních tlakových hladinách (1000, 850, 700 a 500 hPa)

Pro každou hladinu jsou k dispozici informace o třírozměrném poli proudění, teplotě a relativní vlhkosti. Dále databáze obsahuje údaje o proudění v 10 m nad zemským povrchem, o teplotě ve 2 m a celkovou oblačnost.

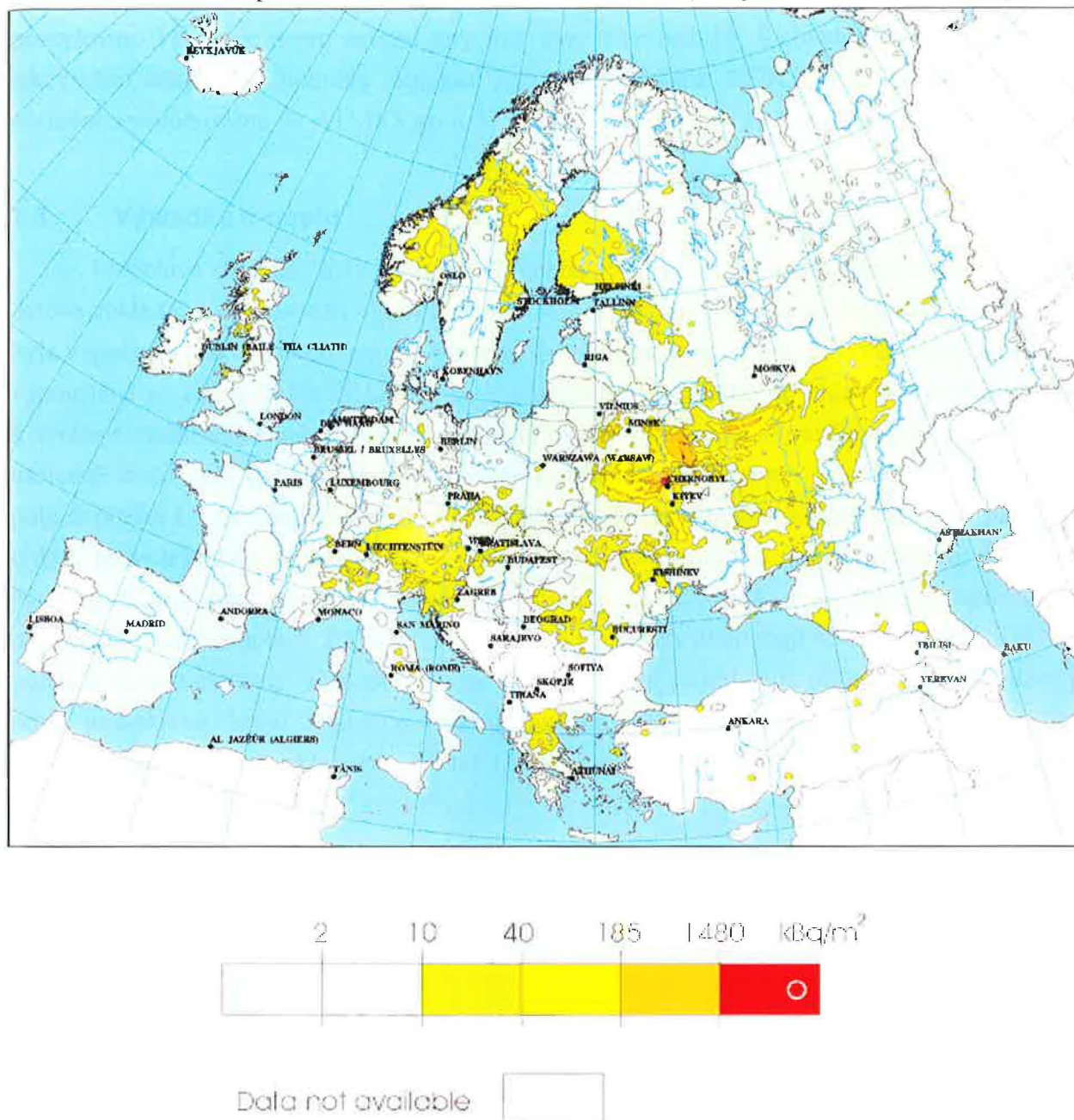
Součástí databáze jsou i předpovězená meteorologická pole (období 25.dubna 1986 12:00 UTC – 30.dubna 1986 12:00 UTC; tj. předpověď na 120 hodin). Časové rozložení dat je opět po 6-ti hodinách.

Analyzovaná pole srážek udávají celkové srážky za každých 6 hodin v oblasti 10° západní délky – 40° východní délky a 35° severní šířky – 70° severní šířky.

7.2.3. Měřené koncentrace izotopů v ovzduší

Aby bylo možno porovnat modelové výsledky s realitou, byla v JRC/Ispra shromážděny údaje o naměřené radioaktivitě v jednotlivých zemích (Radioactivity Environmental Monitoring – REM). Dostupné informace v REM databázi obsahují časový vývoj koncentrací Cs-137 a I-131 spojených s atmosférickým aerosolem. Tyto hodnoty byly měřeny na 95 stanicích po celé Evropě v časovém horizontu dvou až tří týdnů po černobylské havárii. Úroveň koncentrací byla měřena na různých typech filtrů. Charakteristiky jednotlivých měření se liší v závislosti na typu

obrázek 53 Celková depozice Cs-137 měřená 10.května 1986 (zdroj Joint Research Centre)



použitých filtrů i délce expozice média na jednotlivých stanicích. Proto byly stanoveny intergální koncentrace za období jednoho dne (od 9:00 do 9:00 následujícího den) s výjimkou stanovení času příchodu polutantu na stanici. Data byla testována na vzájemnou konzistentnost.

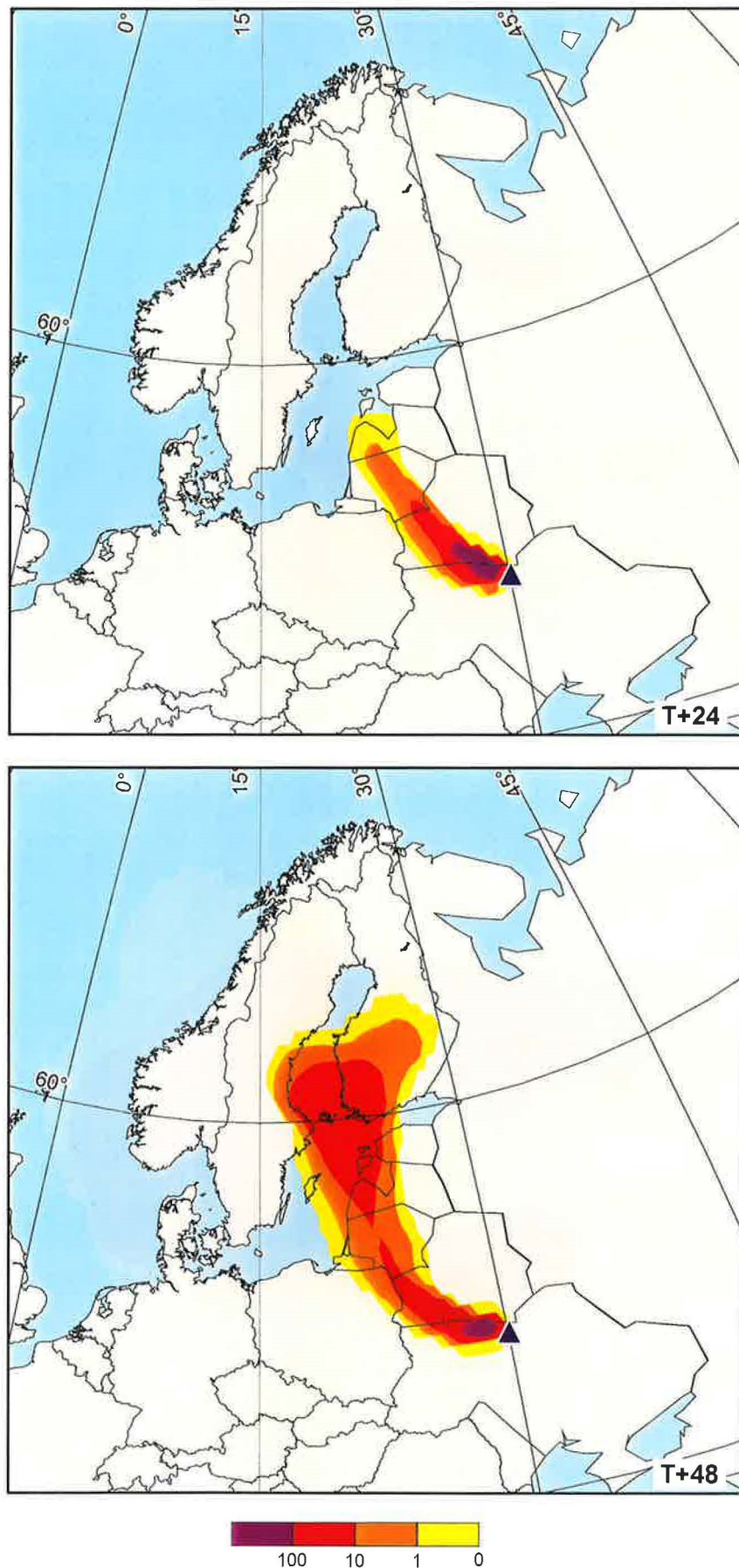
7.2.4. Měřené koncentrace depoziční aktivity

Pouze na několika málo měřicích stanicích byla stanovena denní depozice ihned po černobylské havárii. Tyto hodnoty představují mokrou depozici [Bq/m² nebo Bq/l]. Počet měřicích stanic se se zvětšujícím časovým odstupem od havárie zvyšoval. Pouze 8 hodnot bylo

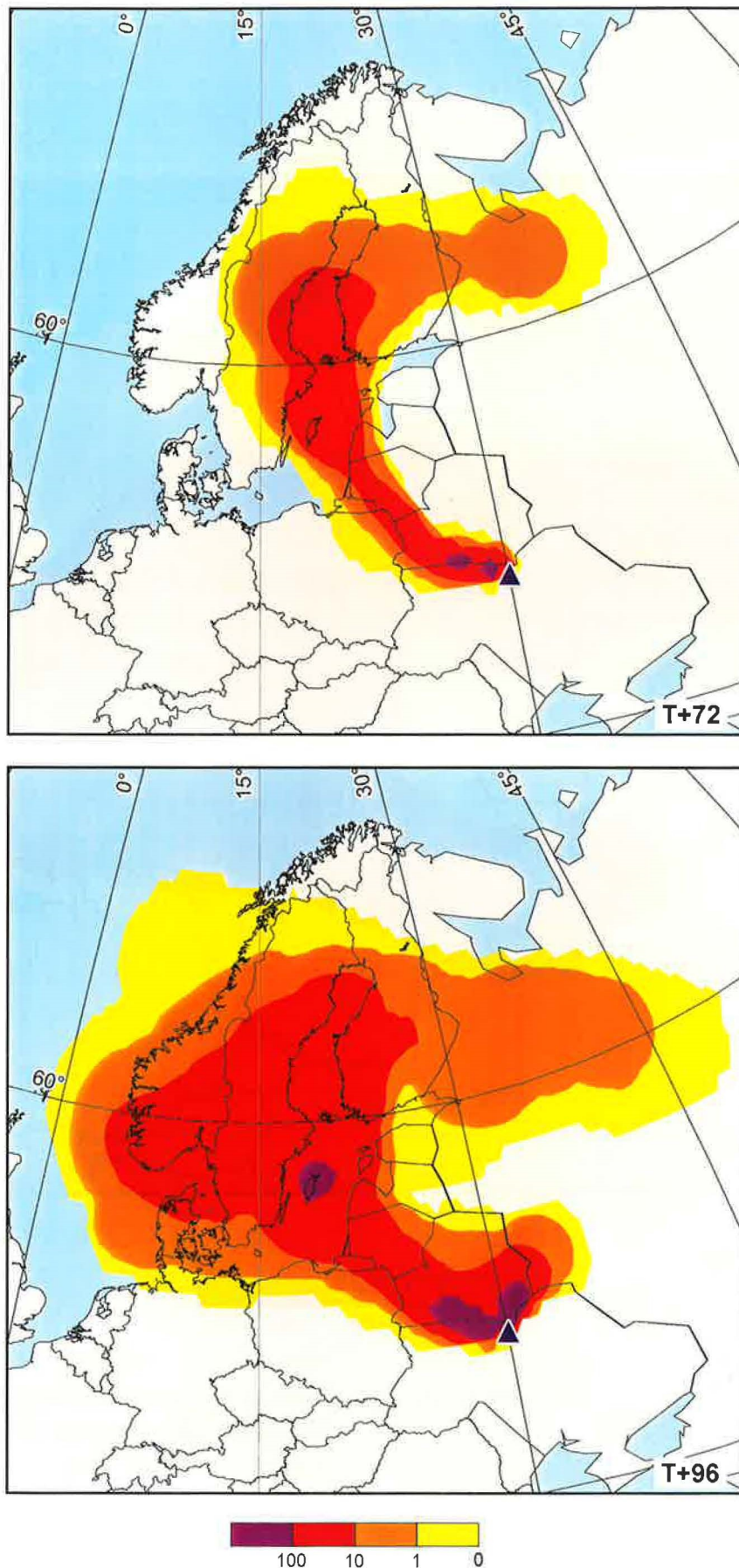
k dispozici 29.dubna, 9 měření 30.dubna a 1.května. 2. a 3. května již hodnotu depozice poskytovalo 11 stanic a pro ostatní dny jich bylo více než 15. S ohledem na nedostatečnost takovýchto údajů byly hodnoty depozice získány z databáze REM. Takto získaná data byla následně zprůměrována do ATMES gridu (1° stupeň v zeměpisné šířce a 2° v zeměpisné délce).

7.3. Výsledky modelu

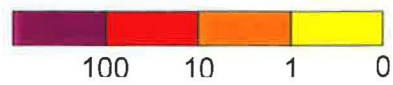
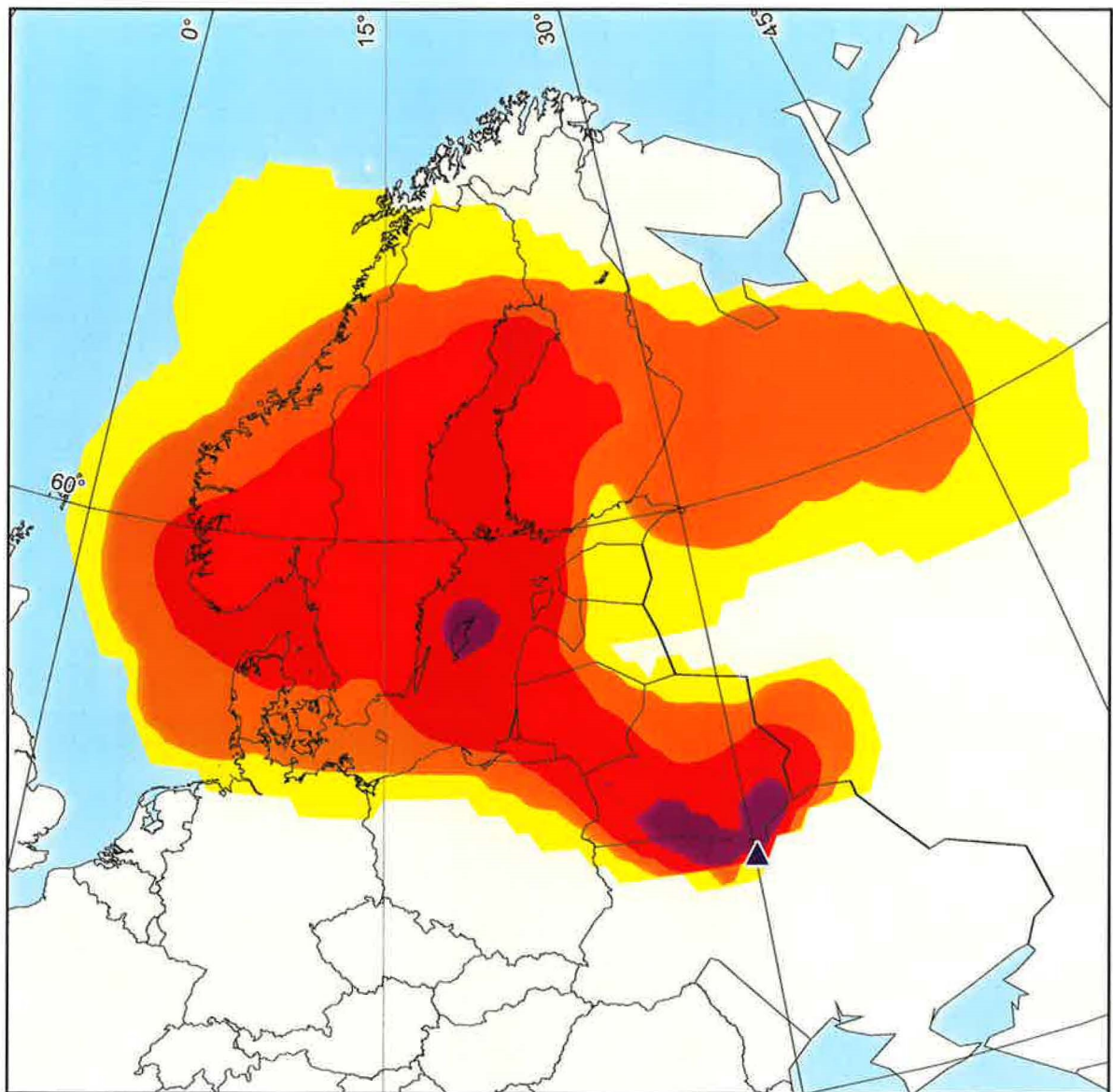
Modelová simulace byla zahájena 26.dubna 1986 ve 21:00 hodin. Vzhledem k omezené datové základně byl proveden výpočet denní depozice Cs-137 pouze na 96 hodin. Kromě toho byla vypočtena celková depozice za 96 hodin. Pro úplnost jsou na obr. 57 vykresleny trajektorie vypouštěné ze zdroje každých 12 hodin. V souladu se skutečností se oblak pohyboval nejprve k severu a zasáhl Skandinávské země. Proudění potom oblak unášelo poněkud k východu, aby se následně stočil zpět nad Rusko. Druhá větev směřovala nad Evropu. Obr. 53 ukazuje měřené pole depozice Cs-137 dne 10.května 1986 (tedy 14 dní po začátku úniku). Zde jsou patrné tři oblasti vyšších hodnot depozice. Jedna v původním směru proudění nad Skandinávií, druhá nad Ruskem a třetí nad střední Evropou. S výjimkou okolí reaktoru se měřené koncentrace pohybovaly pod hodnotami 200 kBq.m^{-2} . Modelové hodnoty překračují hodnotu 100 kBq.m^{-2} též pouze v okolí elektrárny. K mapě celkové depozice, kde se objevuje oblast vyšších hodnot je nutno podotknout, že od okamžiku usazení polutantu na zemský povrch se s ním pracuje jako s pasivní příměsí (nedochází tedy k úbytku radiaktivity rozpadem štěpného materiálu).



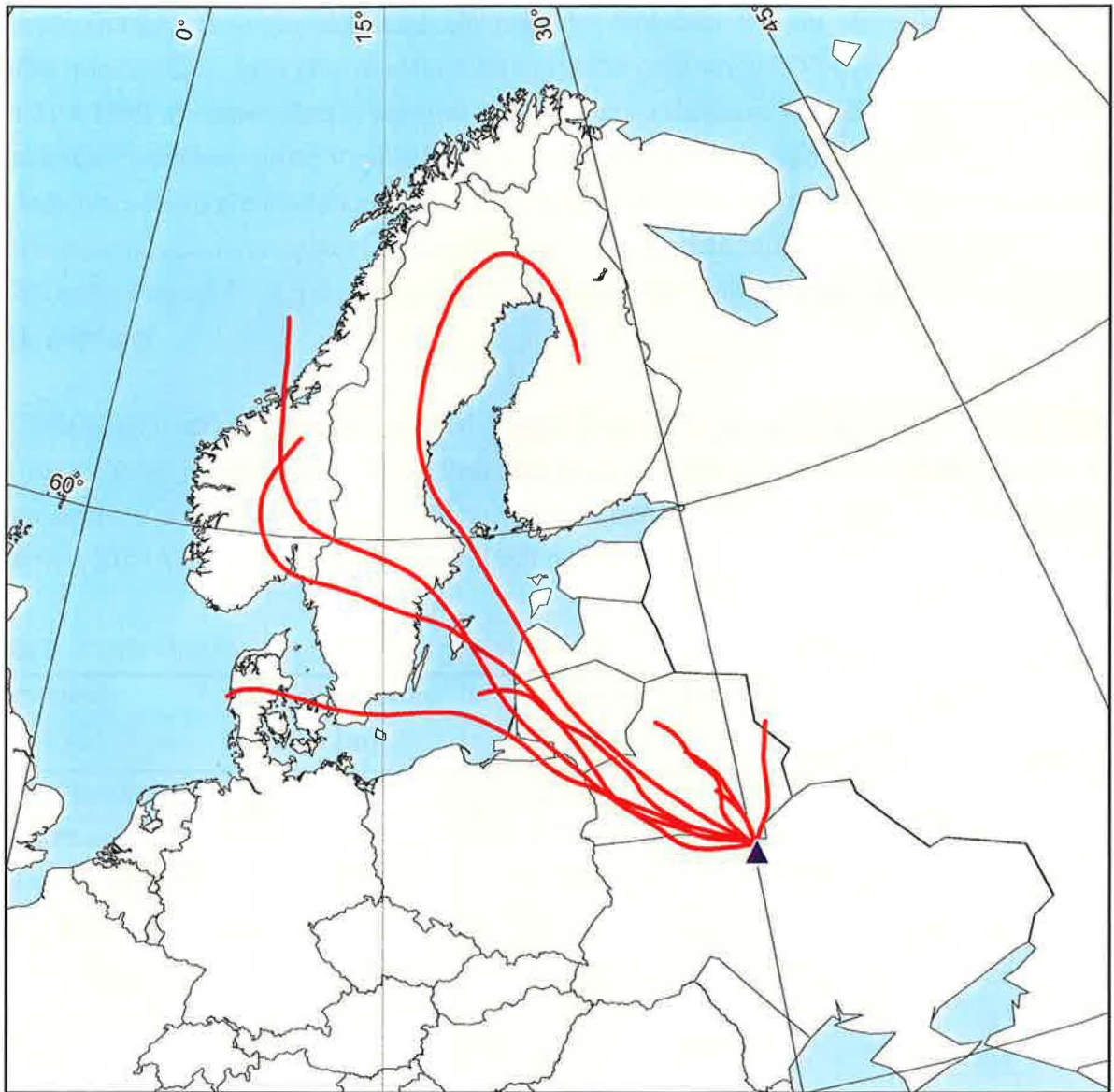
obrázek 54 Černobyľská havária: Denní depozície 24 (nahore), resp. 48 hodín (dole) po začiatku úniku [$\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$]



obrázek 55 Černobylská havárie: Denní depozice 72 (nahore), resp. 96 hodin (dole) po začátku úniku [$\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$]



obrázek 56 Černobyľská havária: Celková depozice za 96 hodin od začátku úniku [kBq.m⁻²]



obrázek 57 Černobylská havárie: Trajektorie vypouštěné ze zdroje každých 12 hodin (všechny trajektorie končí 96 hodin od začátku úniku)

8. TESTOVACÍ VÝPOČET NA ÚZEMÍ ČR

Pro dokumentaci schopnosti modelu pracovat na menší oblasti s podrobnějším modelem (model ALADIN), byl proveden demonstrační výpočet imisní zátěže působené zdroji v podkrušnohorské pánvi (hnědouhelné elektrárny). Vzhledem k tomu, že model nezahrnuje chemické transformace, byla jako modelová látka vybrán oxid siřičitý. Výpočet byl proveden pro termín 21.4.1999 a vstupní data o zdrojích byla získána z databáze REZZO 1 (za předpokladu rovnoměrného rozdělení emise v průběhu roku). Pro srovnání byly výpočty provedeny pro rok 1992, tedy pro období před začátkem prací na snižování emisí, a pro rok 1997, který představuje přibližně poloviční cestu ke splnění emisních limitů. Bylo by jistě zajímavé provést výpočty i pro rok 1999 nebo alespoň 1998, jakožto období plnění emisních limitů, ale tato data nejsou bohužel dosud k dispozici.

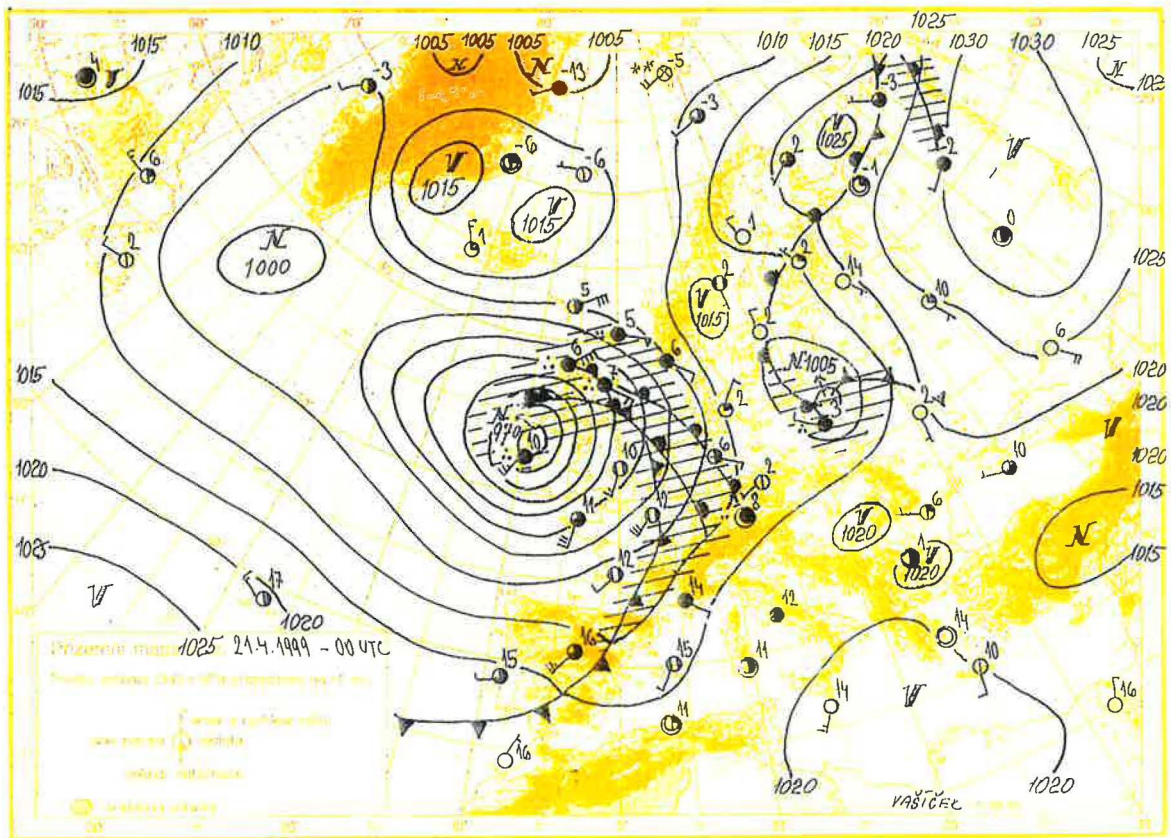
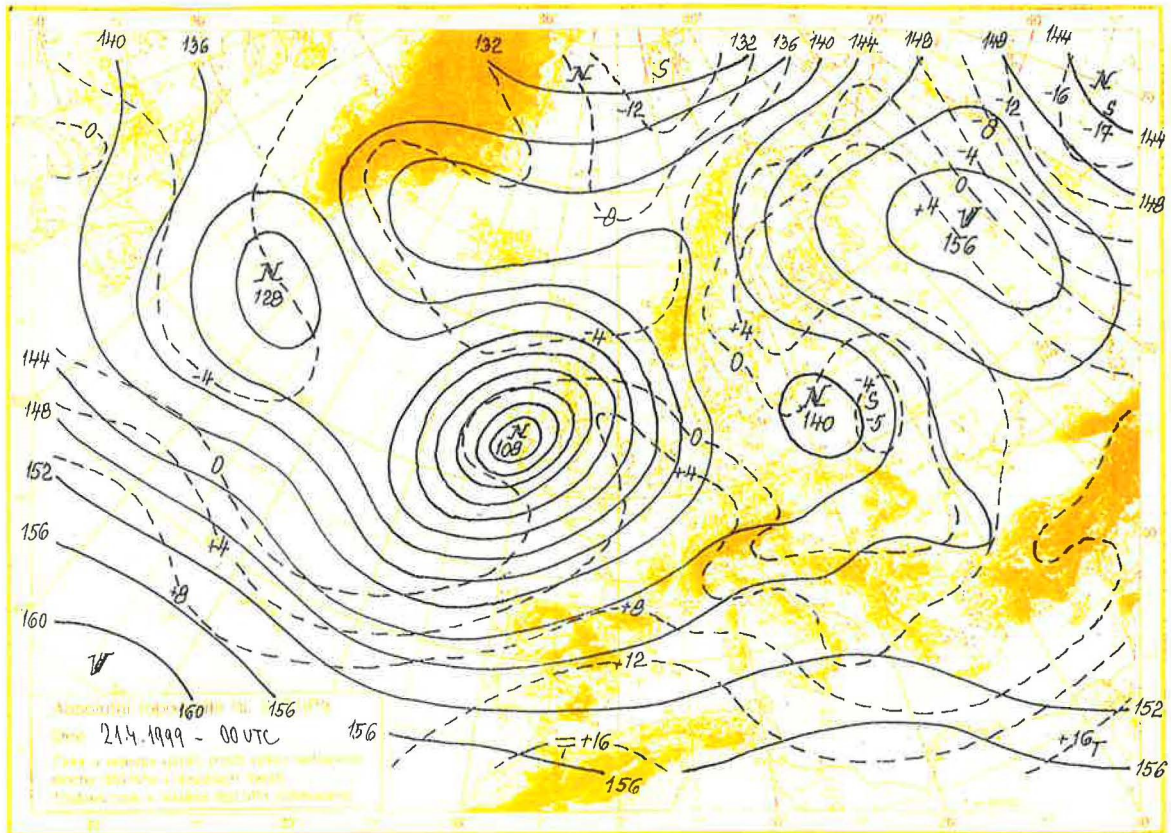
Následující tabulka podává přehled zdrojů použitých pro výpočet včetně jejich roční emise (tento údaj je volně dostupný). Poslední sloupec ukazuje velikost poklesu emisí, ke kterému došlo v průběhu pěti let na vybraných zdrojích. Z údajů je zřejmé, že pruněřovské elektrárny a ELNA Počeradý již byly v roce 1997 odsířeny.

tabulka 7 Podkrušnohorské elektrárny a jejich emise

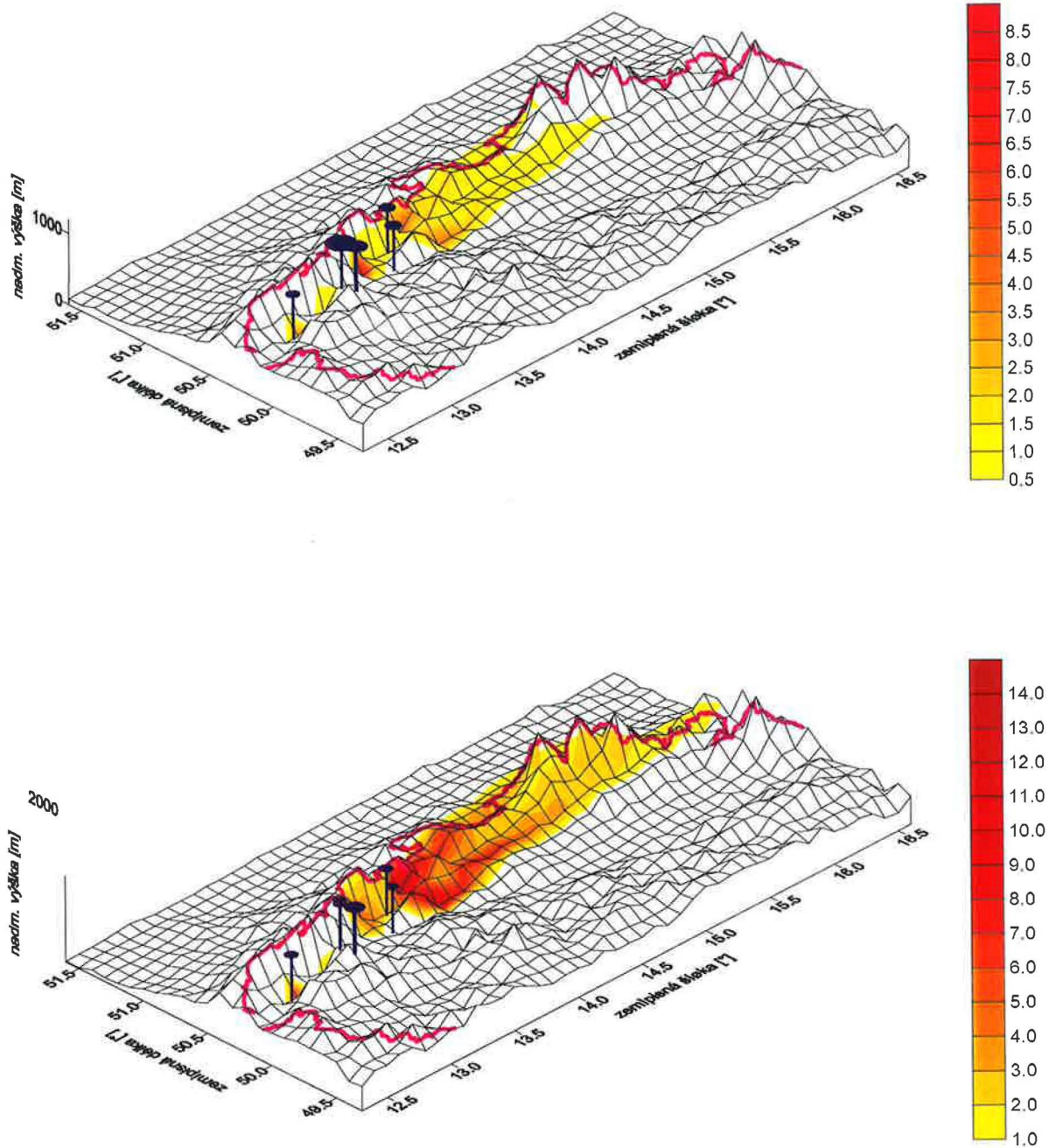
Název zdroje	Výška zdroje [m]	Emise SO ₂ [t/rok]		Pokles emise [%]
		1992	1997	
ELNA Tisová	100	17700	15456	-12.7
ELNA Pruněřov I	200	59700	3473	-94.2
ELNA Pruněřov II	300	163100	11010	-93.2
ELNA Tušimice I	195	48200	35270	-26.8
ELNA Tušimice II	300	88200	68600	-22.2
ELNA Počeradý	200	42900	5581	-87.0
ELNA Ledvice	200	38200	15760	-58.7
Celkem		459992	157147	-65.8

Obrázek 59 dokumentuje pokles imisní zátěže, působené uvažovanými zdroji, který dobře koresponduje s poklesem emisí. Pro výpočet byla vybrána meteorologická situace s tlakovou níží nad Irskem. Západní část republiky se nacházela na jejím předním okraji v jihozápadním proudění. Emitované látky z elektráren byly unášeny podél hřebene Krušných hor k severovýchodu.

obrázek 58 Meteorologická situace dne 21.4.1999



obrázek 59 Průměrné denní koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] působené podkrušnohorskými elektrárnami pro meteorologickou situaci ze dne 21.4.1999 (emise uvažovány pro rok 1992 – nahore, resp. pro rok 1997 – dole)



ZÁVĚR

Cílem této práce bylo otestovat schopnost modelu HYSPLIT predikovat pohyb oblaku znečištění pocházejícího z okamžitých zdrojů na území Evropy. Tato úloha je důležitá pro případ velké chemické nebo nukleární havárie, která by mohla významně zasáhnout do života obyvatelstva v České republice. V rámci projektu Vědy a výzkumu VaV 520/2/98 je model HYSPLIT připravován do operativního provozu v Českém hydrometeorologickém ústavu. Současně probíhá jeho modifikace pro zahrnutí radioaktivního a chemického submodelu tak, aby byl schopen poskytnout komplexní informaci o rozptylovaných materiálech.

V této práci byly, za využití databáze získané v průběhu experimentu ETEX I, testovány čtyři postupy stanovování výšky směšovací vrstvy a tři parametrizace rozptylových parametrů. Ukázalo se, že stávající parametrizace rozptylu vyhovuje potřebám modelování dálkového transportu. Výpočet výšky směšovací vrstvy zahrnutý v modelu pracuje také poměrně uspokojivě, ovšem zvláště v nočních hodinách její velikost poněkud nadhodnocuje.

Model je dobře schopen předpovídat dobu příchodu oblaku znečištění nad danou lokalitu. Stanovení maximálních koncentrací na vybraném místě dává, zvláště pro počáteční hodiny výpočtu, poněkud nadhodnocené výsledky. V souladu s vyššími hodnotami modelových koncentrací je větší i celková dávka na dané lokalitě.

Výsledky modelování v průběhu prvního experimentu ETEX byly poměrně uspokojivé. Naproti tomu při druhém experimentu selhaly prakticky všechny modely zúčastněných organizací. Výjimkou nebyl ani HYSPLIT. To ukazuje, že je nutné pokračovat ve vývoji modelů dálkového transportu znečištění. Pozornost bude nutno věnovat zejména počátečním podmínkám emise, kvalitnějšímu stanovení vnosu vlečky ze zdroje tak, aby lépe odpovídal reálným meteorologickým podmínkám v místě úniku. Je otázkou, zda současné meteorologické prognózní modely jsou schopny poskytnout detailnější informaci o meteorologické situaci v konkrétním místě.

Pro experiment ETEX byla použita nedeponující a nereagující látka. V jeho rámci tedy nebylo možno ověřit depoziční modul. Pro demonstraci výpočtu depozice byl proveden její výpočet pro radioaktivní oblak uvolněný při Černobylské havárii. Autorovi této práce se bohužel nepodařilo získat měřená data, shromážděná v průběhu následné studie ATMES, takže nebylo možno porovnat modelové hodnoty s měřeními.

Model HYSPLIT bude při svém provozu nad územím střední Evropy využívat výsledky regionálního modelu ALADIN, vyvinutého ve spolupráci středoevropských meteorologických služeb a Metéo-France. Pro ukázkou byl proveden výpočet úrovně znečištění, působený

podkrušnohorskými elektrárnami pro jednu meteorologickou situaci. V souladu s očekáváním byla vlečka unášena podél hřebenu Krušných hor. Na tomto výpočtu byl také demonstrován vliv odsiřování těchto zdrojů. Výpočet byl proveden se stejnou meteorologií pro dvě sady emisních dat: pro údaje odpovídající roku 1992 a 1997. Vypočtené hodnoty denních koncentrací poklesly, v souladu s poklesem emisí přibližně na polovinu.

Celkově tato práce ukázala poměrně dobrou využitelnost modelu HYSPLIT pro účely výpočtu dálkového transportu znečištění v Evropě.

Budoucí vývoj modelu

Pro účely operativního využití modelu HYSPLIT v Českém hydrometeorologickém ústavu je nutno zdokonalit spolupráci tohoto modelu se zdrojem meteorologických polí – modelem ALADIN. Pro výpočty na větší oblasti bude nutno vyhledat dodatečný zdroj, který by poskytoval předpověď na větší oblasti než model ALADIN (zde připadá v úvahu ECMWF – v případě našeho vstupu do této organizace nebo spolupráce s některou jinou meteorologickou službou (např. DWD)).

Druhým úkolem je dokončení adaptace modelu tak, aby byl schopen spolupracovat s radioaktivním a chemickým submodelem. Zvláště implementace chemického submodelu do Lagrangeovského modelu přináší řadu úskalí, zejména z důvodu závislosti rychlostí některých chemických reakcí na celkové koncentraci v daném místě výpočetní oblasti.

Pozornost bude také věnována stanovení efektivní výšky zdroje (dosud je tato hodnota zadávána operátorem). Její nesprávná hodnota může ovlivnit celý výpočet (např. vlivem vertikálního stříhu větru).

LITERATURA

- [1] Alcamo J., Shaw R., Hordijk L., The RAINS model of Acidification, Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, 1990
- [2] Bednář J., Zikmunda O., Fyzika mezní vrstvy atmosféry, Academia, Praha, 1985
- [3] Beyrich F., Gryning S.E., On the determination of mixing height: A review, Proceedings of the 4th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 6-9 May 1996, VITO, Mol, 1996
- [4] Boville B. a kol., Global Tracer Transport Model, WMO report no.26, Geneve, 1997
- [5] Brandt J., Modelling Transport, Dispersion and Deposition of Passive Tracers from Accidental Releases, Ministry of Environment and Energy, Risoe National Laboratory, 1998
- [6] Bubník J., Keder J., Macoun J., Maňák J., SYMOS'97 Systém modelování stacionárních zdrojů, Metodická příručka, ČHMÚ, Praha, 1998
- [7] Collins W., Stevenson D., Johnson C., Derwent R., A Simulation of Long-Range Transport of CFCs in the Troposphere Using a 3-D Global Lagrangian Model with 6-hourly Meteorological Fields, Proceedings of the 22nd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application, June 2-6, 1997, Library of Congress, Washington, 1997
- [8] Coppalle A., Paranthoen P., Prediction of high pollution episodes with a Lagrangian puff model, Proceedings of the 3rd Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 21-24 November 1994, VITO, Mol, 1994
- [9] Čapek R., Mikšovský M., Mucha L., Geografická kartografie. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 1992
- [10] Degrazia G., Modelling Dispersion Parameters in a Planetary Boundary Layer Dominated by Convection, Proceedings of the 22nd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application, June 2-6, 1997, Library of Congress, Washington, 1997
- [11] Desiato F., Anfossi D., Intercomparison of Two Long-Range Lagrangian Particle Models with ETEX Tracer Data, Proceedings of the 22nd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application, June 2-6, 1997, Library of Congress, Washington, 1997
- [12] Draxler R., Description of the HYSPLIT 4 Modeling System, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, Silver Spring, 1997
- [13] Erbrink J., Cenedese A., Preprocessing of meteorological data: Vertical profiles, Proceedings of the 4th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 6-9 May 1996, VITO, Mol, 1996
- [14] Fay B., Evaluation and intercomparison of mixing height derived from a Richardson number scheme and other mixing height formulas using operational NWP models at the German weather service, Proceedings of the 5th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 18-21 May 1998, "National Centre for Scientific Research ""Demokritos""", Attikis, 1998

-
- [15] Graziani G., Galmarini S., Grippa G., Klug W.. Real-Time Long-Range Dispersion Model Evaluation of the ETEX Second Release, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1998
- [16] Graziani G., Klug W., Mosca S., Real-Time Long-Range Dispersion Model Evaluation of the ETEX First Release, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1998
- [17] Irwin J., Statistical evaluation of atmospheric dispersion models, Proceedings of the 5th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 18-21 May 1998, "National Centre for Scientific Research ""Demokritos""", Attikis, 1998
- [18] Johansen P.-E., Zilitinkevich S., Parametrization of the stable boundary layer height, Proceedings of the 5th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 18-21 May 1998. "National Centre for Scientific Research ""Demokritos""", Attikis, 1998
- [19] Klug W. a kol., Evaluation of Long-Range Atmospheric Transport Models Using Environmental Radioactivity Data from the Chernobyl Accident. Elsevier Applied Science, London, 1992
- [20] Koracin D., Isakov V., A method of evaluating atmospheric models by using tracer measurements, Proceedings of the 5th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 18-21 May 1998, "National Centre for Scientific Research ""Demokritos""", Attikis. 1998
- [21] Longoni M., Tamponi M., Results of sensitivity analysis of some methods to evaluate scaling parameters, Proceedings of the 4th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 6-9 May 1996, VITO, Mol, 1996
- [22] Lyons T., Scott W., Principles of Air Pollution Meteorology, CRC Press, Boston, 1990
- [23] Mason R., Lind D., Statistical Techniques in Business and Economics, Library of Congress, Washington, 1990
- [24] Mosca S. a kol., ATMES II - Evaluation of Long-Range Dispersion Models Using Data of the 1st ETEX Release, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1998
- [25] Moussiopoulos N., State of the art of air pollution models, needs and trends, Proceedings of the 4th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 6-9 May 1996, VITO, Mol, 1996
- [26] Nieuwstadt F., van Dop H., Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1982
- [27] Nodop K., ETEX Symposium on Long-Range Atmospheric Transport, Model Verification and Emergency Response (Proceedings), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1997
- [28] Plate E., Engineering meteorology, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 1982
-

-
- [29] Sozzi R., Favaron M., Direct and indirect methods for momentum and turbulent heat flux computation in the surface layer, Proceedings of the 4th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 6-9 May 1996, VITO, Mol, 1996
- [30] Steyn D., Batchvarova E., Gryning S.E., Observation and Modelling of Boundary Layer Depth in a Region with Complex Terrain and Coastline, Proceedings of the 22nd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application, June 2-6, 1997, Library of Congress, Washington, 1997
- [31] Syrakov D., Batchvarova E., Bulgarian puff model: results on the workshop data sets, Proceedings of the 3rd Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 21-24 November 1994, VITO, Mol, 1994
- [32] Syrakov D., Batchvarova E., Wiman B., Long-Range Air Pollution: from Models to Policies, Pensoft, Sofia, 1997
- [33] Szepesi D., Compendium of Regulatory Air Quality Simulation Models, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1989
- [34] Taylor A., Conformal map transformations for meteorological modelers, NOAA, ARL, Silver Spring, 1995
- [35] Vanýsek V., Základy astronomie a astrofyziky, Academia, Praha, 1980
- [36] Zannetti P., Air Pollution Modelling, Computational Mechanics Publications, New York, 1990
- [37] Directory of Atmospheric Tracer Experiments. EURASAP, London, 1988
- [38] EMEP - A Statistical Method for Estimation of European Sulphur Emission Using EMEP Monitoring Data, MSC-W, Oslo, 1996
- [39] EMEP - Transboundary Air Pollution in Europe. MSC-W, Oslo, 1996
- [40] Practical atmospheric dispersion modelling course 24-26 April 1995, University of Cambridge, Cambridge, 1995
- [41] Směrnice pro kvalitu ovzduší v Evropě, MŽP ČR, Praha, 1996
- [42] The European Tracer Experiment, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1998
- [43] Zpráva o ochraně čistoty ovzduší v Krušných horách, MŽP ČR, Praha, 1997

SEZNAM TABULEK

tabulka 1	Rozdělení rozptylových modelů podle velikosti výpočetní oblasti.....	9
tabulka 2	Emisní údaje pro experiment ETEX.....	33
tabulka 3	ETEX 1: Statistické charakteristiky jednotlivých modelů vypočtené pro naměřené a modelové tříhodinové průměrné koncentrace na jednotlivých stanicích.....	65
tabulka 4	ETEX 1: Statistické charakteristiky jednotlivých variant modelu vypočtené pro dané parametry experimentálních výsledků	74
tabulka 5	ETEX 2: Statistické charakteristiky základní varianty modelu pro dané parametry experimentálních výsledků	78
tabulka 6	Emise při havárii na Černobylském reaktoru.....	83
tabulka 7	Podkrušnohorské elektrárny a jejich emise.....	91

SEZNAM OBRÁZKŮ

obrázek 1	Vývoj celkové emisní zátěže síry (ve formě SO ₂) a oxidů dusíku (ve formě NO ₂) v kt/rok v zemích projektu EMEP (včetně námořní dopravy v odpovídající oblasti)5	
obrázek 2	Vývoj emisí základních škodlivin v České republice v letech 1987 – 1998 [kt/rok] (zdroj ročenka ČHMÚ).....	6
obrázek 3	Podíly jednotlivých typů zdrojů REZZO na celkové emisní zátěži v roce 1997.....	6
obrázek 4	Mapy severní polokoule, resp. světa, v normální poloze pro podporovaná zobrazení: a) Lambertova azimutální mapa, b) Mercatorova mapa, c) stereografická mapa ...	15
obrázek 5	Dělení puffů na 4 resp. na 5 částí (nahore), dole – plocha ukazuje podíl výsledné koncentrace od nových puffů a koncentrace působené původním oblakem, červené izoplochy ukazují úroveň koncentrace od daného puffu (c/c_{\max}), modrá čára vymezuje oblast poklesu koncentrace na 0,001 vzhledem k c_{\max}	20
obrázek 6	Vertikální štěpení oblaku.....	21
obrázek 7	Závislost depoziční rychlosti a Cunninghamova korekčního členu pro malé částice na průměru prachových částic (při normálních podmínkách)	26
obrázek 8	Velikost parametru drsnosti pro různé povrchy	29
obrázek 9	Zařízení pro vypuštění stopovací látky v rámci ETEXu	34
obrázek 10	Meteorologická situace dne 23.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment).....	36
obrázek 11	Meteorologická situace dne 24.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment).....	37
obrázek 12	Meteorologická situace dne 25.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment).....	38
obrázek 13	Meteorologická situace dne 26.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment).....	39
obrázek 14	Meteorologická situace dne 27.10.1994 v 00:00 hodin (první experiment)	40
obrázek 15	Meteorologická situace dne 14.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)	41
obrázek 16	Meteorologická situace dne 15.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)	42
obrázek 17	Meteorologická situace dne 16.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)	43
obrázek 18	Meteorologická situace dne 17.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)	44
obrázek 19	Meteorologická situace dne 18.11.1994 v 00:00 hodin (druhý experiment)	45
obrázek 20	Přehled měřicích stanic experimentu ETEX.....	47
obrázek 21	ETEX 1: Měřený oblak po 12 (nahore), resp. po 24 hodinách od začátku experimentu	48
obrázek 22	ETEX 1: Měřený oblak po 36 (nahore), resp. po 48 hodinách (dole) od začátku experimentu	49
obrázek 23	ETEX 1: Měřený oblak po 60 hodinách od začátku experimentu.....	50
obrázek 24	ETEX 2: Měřený oblak po 12 (nahore), resp. po 24 hodinách od začátku experimentu	51

obrázek 25	ETEX 2: Měřený oblak po 36 (nahore), resp. po 48 hodinách (dole) od začátku experimentu	52
obrázek 26	ETEX 2: Měřený oblak po 60 hodinách od začátku experimentu.....	53
obrázek 27	ETEX 1: Modelový oblak po 12 (nahore), resp. po 24 hodinách (dole) od začátku experimentu (základní metoda výpočtu – MIX1, DSP1)	55
obrázek 28	ETEX 1: Modelový oblak po 36 (nahore), resp. po 48 hodinách (dole) od začátku experimentu (základní metoda výpočtu – MIX1, DSP1)	56
obrázek 29	ETEX 1: Modelový oblak po 60 hodinách od začátku experimentu (základní metoda výpočtu – MIX1, DSP1)	57
obrázek 30	ETEX 1 – trajektorie vypouštěné po 1 hodině po dobu činnosti zdroje (všechny trajektorie jsou ukončeny po 60 hodinách od začátku experimentu).....	58
obrázek 31	ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu - MIX2)	60
obrázek 32	ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu – MIX3).....	61
obrázek 33	ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu – MIX4).....	62
obrázek 34	ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu – DSP2).....	63
obrázek 35	ETEX 1: Modelový oblak po 12, 24, 36, 48 a 60 hodinách od začátku experimentu (metoda výpočtu – DSP3).....	64
obrázek 36	Rozptylový diagram zpracovaný pro všechna platná měření v jednotlivých variantách modelu.....	66
obrázek 37	Rozptylový diagram zpracovaný pro platná měření v čase T+24 pro jednotlivé varianty modelu	67
obrázek 38	Rozptylový diagram zpracovaný pro platná měření v čase T+48 pro jednotlivé varianty modelu	68
obrázek 39	Rozptylový diagram zpracovaný pro platná měření v čase T+60 pro jednotlivé varianty modelu	69
obrázek 40	Porovnání měřených a modelových tříhodinových průměrných koncentrací na stanici CR01 – Červená	70
obrázek 41	Porovnání měřených a modelových tříhodinových průměrných koncentrací na stanici H01 – Nagykanizsa.....	71
obrázek 42	Porovnání měřených a modelových tříhodinových průměrných koncentrací na stanici PL03 – Klodzko.....	72
obrázek 43	Porovnání měřených a modelových tříhodinových průměrných koncentrací na stanici SR01 – Jaslovské Bohunice.....	73

obrázek 44	Rozptylový diagram zpracovaný pro celkovou (60-ti hodinovou) dávku na jednotlivých stanicích (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu).....	75
obrázek 45	Rozptylový diagram zpracovaný pro maximální koncentraci na dané stanici (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu)	76
obrázek 46	Rozptylový diagram zpracovaný pro dobu výskytu (od počátku úniku) maximální koncentraci na dané stanici (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu).....	76
obrázek 47	Rozptylový diagram zpracovaný pro dobu příchodu oblaku na danou stanici (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu)	77
obrázek 48	Rozptylový diagram zpracovaný pro dobu přítomnosti oblaku nad danou stanici (zobrazeny pouze vybrané varianty modelu)	77
obrázek 49	ETEX 2: Modelový oblak po 12 (nahore), resp. po 24 hodinách (dole) od začátku experimentu (základní metoda výpočtu – MIX1, DSP1)	79
obrázek 50	ETEX 2: Modelový oblak po 24 (nahore), resp. po 48 hodinách (dole) od začátku experimentu (základní metoda výpočtu – MIX1, DSP1)	80
obrázek 51	ETEX 2: Modelový oblak po 60 hodinách od začátku experimentu (základní metoda výpočtu – MIX1, DSP1)	81
obrázek 52	Blok 4 černobylského reaktoru po havárii	82
obrázek 53	Celková depozice Cs-137 měřená 10.května 1986 (zdroj Joint Research Centre) ..	85
obrázek 54	Černobylská havárie: Denní depozice 24 (nahore), resp. 48 hodin (dole) po začátku úniku [kBq.m-2]	87
obrázek 55	Černobylská havárie: Denní depozice 72 (nahore), resp. 96 hodin (dole) po začátku úniku [kBq.m-2]	88
obrázek 56	Černobylská havárie: Celková depozice za 96 hodin od začátku úniku [kBq.m-2]	89
obrázek 57	Černobylská havárie: Trajektorie vypouštěné ze zdroje každých 12 hodin (všechny trajektorie končí 96 hodin od začátku úniku)	90
obrázek 58	Meteorologická situace dne 21.4.1999	92
obrázek 59	Průměrné denní koncentrace [$\mu\text{g.m}^{-3}$] působené podkrušnohorskými elektrárnami pro meteorologickou situaci ze dne 21.4.1999 (emise uvažovány pro rok 1992 – nahore, resp. pro rok 1997 – dole)	93