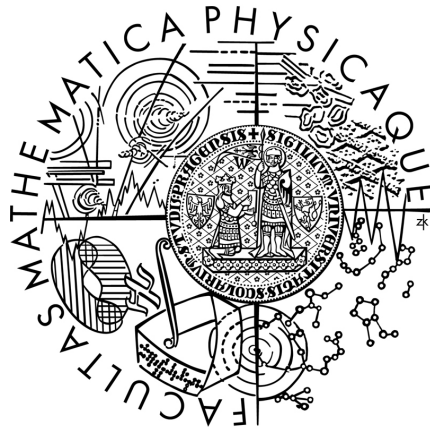


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Michaela Valachová

Bouřka jako nebezpečný atmosférický jev a možnosti její předpovědi

Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D.
Studijní program: Fyzika, Meteorologie a klimatologie

2009

Ráda bych poděkovala všem, kteří se na této práci podíleli, jmenovitě především vedoucímu diplomové práce Mgr. Michalu Žákovi, Ph.D. a konzultantu Mgr. Stanislavu Rackovi z Oddělení meteorologických předpovědí ČHMÚ za cenné rady a připomínky k danému textu. Poděkování za poskytnutá data a materiály, bez kterých by tato práce nemohla být provedena, náleží Českému hydrometeorologickému ústavu. Děkuji RNDr. Radmile Brožkové, CSc., RNDr. Filipu Váňovi, Ph.D. a Mgr. Tomáši Královi z Oddělení numerických předpovědí počasí ČHMÚ za ochotu a pomoc při práci na serveru voodoo. V neposlední řadě patří obrovský dík mé rodině a přátelům za neutuchající podporu a motivaci.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne

Michaela Valachová

Obsah

Úvod	v
Seznam zkratk a symbolů	vi
1 Bouřka, klasifikace bouřek a podmínky vzniku	1
1.1 Pojem bouřka versus bouře	1
1.2 Podmínky pro vznik bouřek z hlediska synoptické situace	1
1.2.1 Bouřky frontální	1
1.2.2 Bouřky uvnitř vzduchové hmoty	2
1.3 Podmínky pro vznik bouřek z hlediska stability ovzduší	3
2 Konvekční bouře	6
2.1 Konvekční oblak a jeho dynamika	6
2.2 Klasifikace konvekčních bouří	8
2.2.1 Jednoduchá konvekční buňka	8
2.2.2 Multicelární bouře	9
2.2.3 Supercelární bouře	12
2.2.4 Mezosynoptické konvekční systémy	13
2.3 Klasifikace doprovodných jevů	14
2.3.1 Atmosférické srážky	14
2.3.2 Silný vítr	16
2.3.3 Elektrická aktivita	18
3 Základní metody předpovědi bouřek	20
3.1 Aerologické výstupy	21
3.1.1 Indexy stability	21
3.1.2 Hodograf větru	24
3.2 Využití metod dálkové detekce	25
3.2.1 Meteorologické radary	26
3.2.2 Meteorologické družice	27
3.2.3 Systémy detekce a lokalizace blesků	28
3.3 Výstupy numerických modelů	29
3.3.1 Numerický předpovědní model ALADIN	31
3.3.2 Numerický předpovědní model ECMWF	32
3.3.3 Numerický předpovědní model GFS	33

4	Výstrahy na nebezpečné jevy související s konvekcí	34
4.1	Systém integrované výstražné služby	34
4.2	Výstrahy na bouřky s doprovodnými jevy	35
4.3	Meteoalarm	36
5	Vybrané bouřkové případy sezóny 2008	37
5.1	Používaná data a materiály	37
5.2	31. květen	38
5.3	3. červen	43
5.4	25. červen	48
5.5	3. červenec	55
5.6	13. červenec	59
6	Vyhodnocení „bouřkové sezóny“	64
6.1	Vyhodnocení předpovědi ČHMÚ	64
6.2	Vyhodnocení systému SIVS	65
6.3	Zlepšení předpovědi konvekčních bouří...?	66
	Závěr	68
	Literatura	69
	Příloha	73

Název práce: Bouřka jako nebezpečný atmosférický jev a možnosti její předpovědi

Autor: Bc. Michaela Valachová

Katedra: Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D.

e-mail vedoucího: Michal.Zak@mff.cuni.cz

Abstrakt: V předložené práci se zabýváme možností předpovědi bouřek. Konvekční bouře jsou pravděpodobně jedním z nejvážnějších následků nebezpečného počasí v České republice. I přes velký pokrok v metodách numerické předpovědi počasí je předpověď jejich výskytu a odhad jejich intenzity velmi obtížná, zvláště pokud se jedná o vydání výstražné informace pro konkrétní oblast. Jsou zde zahrnuty poznatky o možnostech předpovědi silné konvekce používaných v dnešní době. Na základě konkrétních případů silných bouří na území České republiky jsme zkoumali úspěšnost jejich předpovědí. Používali jsme k tomu data z numerických předpovědních modelů počasí, aerologických stanic a z dálkového průzkumu Země. Vybrané situace byly zhodnoceny s ohledem na praktické využití ve výstražném systému SIVS používaném v Českém hydrometeorologickém ústavu.

Klíčová slova: konvekční bouře, nebezpečný jev, předpověď bouřek, výstražný systém

Title: Thunderstorm as a hazardous atmospheric phenomenon and possibilities of its forecasting

Author: Bc. Michaela Valachová

Department: Department of Meteorology and Environment Protection

Supervisor: Mgr. Michal Žák, Ph.D.

Supervisor's e-mail address: Michal.Zak@mff.cuni.cz

Abstract: In the presented work we deal with the possibility of thunderstorm forecasting. Convective storms are probably the most serious consequences of severe weather in the Czech Republic. Even through the big progress in numerical weather prediction methods, the forecast of their occurrence and intensity estimation remains very difficult when issuing warning information for the given area. Knowledge of nowadays possibilities of strong convection forecasting is included. To study the success of the thunderstorm prediction we chose the set of thunderstorm events with significant convective phenomena identified in the Czech Republic. Data from numerical weather prediction models, aerological stations and remote sensing of Earth were used. These selected cases were assessed with respect to practical using in the Integrated Warning System in the Czech Hydrometeorological Institute.

Keywords: convective storm, hazardous phenomenon, storm forecasting, warning system

Úvod

Počasí odpradávná doprovází člověka a velmi ovlivňuje jeho každodenní život. Je proto přirozené, že jevy odehrávající se v zemské atmosféře vždy upoutávaly lidskou mysl a brzy se staly předmětem nikdy nekončícího bádání. Bouřky jako výrazné nebezpečné povětrnostní jevy patří neustále k oněm projevům počasí, které přitahují pozornost celé řady meteorologů i široké veřejnosti. Silná konvekce s sebou může přinést nebezpečí ve formě silných bouří doprovázených přívalovými srážkami, krupobitím, prudkými nárazy větru, až extrémně silnými výstupnými a sestupnými proudy, tornády nebo výraznou elektrickou aktivitou. Každý rok způsobuje značné škody v podobě lokálních povodní z přívalových srážek, poškození úrody nebo majetku krupobitím a silným větrem, který často působí problémy také v silniční, železniční i letecké dopravě a zaměstnává hasičské záchranné sbory.

Z hlediska bezpečnosti se proto nabízí otázka, zda je předpovědní meteorologická služba, využívající poznatků dynamické i synoptické meteorologie, schopna rozlišit den s potenciálním nebezpečím silné konvekce ode dne s běžnými bouřkami bez vážnějších následků. Jestli je možné vymezit prostor a dobu výskytu nebezpečných jevů a včas vydat výstrahu, která může alespoň z části zamezit význačným škodám či ztrátě na životech. Český hydrometeorologický ústav je pověřenou organizací pro výkon výstražné služby před nebezpečnými meteorologickými a hydrologickými jevy. K naplnění tohoto úkolu mu slouží Systém integrované výstražné služby SIVS.

Důvodem k výběru tohoto tématu diplomové práce nebyla jen fascinace konvekčními bouřkami, jejich strukturou, rozmanitostí a obrovskou přírodní silou budící respekt. Cílem diplomové práce bylo přehledně shrnout poznatky o možnostech předpovědi silné konvekce na základě přečtené odborné literatury a na konkrétních případech výskytu silných bouřek v roce 2008 zhodnotit úspěšnost současných metod s ohledem na praktické využití ve výstražném systému. Účelem bylo také zhodnotit celkovou úspěšnost předpovědi bouřek v roce 2008 v předpovědní službě ČHMÚ.

V první kapitole jsou rozepsány všeobecné poznatky o podmínkách pro vznik bouřek z hlediska synoptické situace a z hlediska stability ovzduší. V kapitole druhé se seznamujeme s dynamikou konvekčního oblaku a s klasifikací konvekčních bouří podle jejich struktury. Jsou zde jednotlivě rozebrány také doprovodné jevy bouří. Základní metody předpovědi bouřek, jejich možnosti, výhody i nevýhody, jsou uvedeny v kapitole 3. Čtvrtá kapitola nás seznamuje s vydáváním výstrah na nebezpečné povětrnostní jevy a se Systémem integrované výstražné služby. V kapitole 5 je popsáno pět konkrétních bouřkových případů, které se vyskytly v České republice v letní polovině roku 2008. V příloze se nacházejí obrázky nejlépe dokumentující popsanou situaci, na příloženém CD jsou pak uvedena všechna použitá data a materiály, které jsme měli k dispozici. Kapitola šestá pak celkově hodnotí námi zkoumanou bouřkovou sezónu.

Seznam zkratek a symbolů

BRN	„bulk“ Richardsonovo číslo (Bulk Richardson Number)
BWER	uzavřená oblast snížené radiolokační odrazivosti (Bounded Weak Echo Region)
CAPE	konvekční dostupná potenciální energie (Convective Available Potential Energy)
Cb	<i>Cumulonimbus</i>
CIN	konvekční zábrana, útlum (Convective INhibition)
CPP	Centrální předpovědní pracoviště ČHMÚ
Cu	<i>Cumulus</i>
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ECMWF	Evropské centrum pro střednědobou předpověď počasí (European Center for Medium range Weather Forecasting)
EUMETNET	Sdružení evropských meteorologických služeb (The Network of European Meteorological Services)
EUMETSAT	Evropská organizace pro využití meteorologických družic (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites)
HHO	horní hranice oblačnosti
HNV	hladina nulového vztlaku (Equilibrium Level)
HVK	hladina volné konvekce (Level of Free Convection)
IVEJ	informace o výskytu extrémních jevů
KKH	konvekční kondenzační hladina (Convective Condensation Level)
MAX Z 3D	pole maximální radiolokační odrazivosti s bočními průměty
MCS	mezosynoptický konvekční systém (Mesoscale Convective System)
MSG	družice Meteosat druhé generace (Meteosat Second Generation)
NWP	numerická předpověď počasí (Numerical Weather Prediction)
OMP	Oddělení meteorologických předpovědí ČHMÚ
PVI	předpovědní výstražná informace
RPP	Regionální předpovědní pracoviště ČHMÚ
SELČ	středoevropský letní čas
SIVS	Systém integrované výstražné služby
SREH	helicita vztažená k bouři (Storm Relative Helicity)
UTC	koordinovaný světový čas (Universal Time Coordinated)
VKH	výstupná kondenzační hladina (Lifting Condensation Level)
WMO	Světová meteorologická organizace (World Meteorological Organization)

B	archimedovská vztlaková síla
γ	lokální vertikální gradient teploty
γ_a	suhoadiabatický gradient
γ_s	nasyceně adiabatický gradient
g	tíhové zrychlení
T'	teplota vzduchové částice
T_e	teplota okolního vzduchu
Θ	potenciální teplota
Θ_e	adiabatická ekvivalentní potenciální teplota
ω	relativní vorticitá
Z	radiolokační odrazivost

Kapitola 1

Bouřka, klasifikace bouřek a podmínky vzniku

1.1 Pojem bouřka versus bouře

Bouřka je podle [12] definována jako soubor elektrických, optických a akustických jevů v atmosféře, které vznikají mezi oblaky druhu *Cumulonimbus* (Cb) navzájem nebo mezi těmito oblaky a zemí. Cb bývá nazýván bouřkovým oblakem - bouřky se vyskytují jen u tohoto druhu oblaku (avšak výskyt Cb není jedinou podmínkou pro rozvoj bouřkové činnosti). Bouřka bývá doprovázena mnoha nebezpečnými meteorologickými jevy jako jsou prudké nárazy větru, silné výstupné a sestupné pohyby, vydatné srážky, krupobití či tornáda (podrobněji viz část 2.3). Ve středních zeměpisných šířkách se bouřka na pevnině vyskytuje nejčastěji v létě, v zimě je vzácná.

Většinou dochází k záměně nebo k zjednodušenému či nepřesnému použití pojmů bouřka a bouře, nejedná se však o stejný přírodní úkaz. Konvekční bouře je souhrnným označením jevů vázaných na konvekční oblačnost druhu Cb, která je doprovázena např. právě výskytem bouřky [12]. Pojem bouřka vychází z meteorologických pozorování na pozemních stanicích a je zaměřený na elektrickou aktivitu konvekční bouře. I v této práci budeme používat běžně zažitá termíny, z kontextu však bude zřejmé, zda-li se jedná o bouři či bouřku.

1.2 Podmínky pro vznik bouřek z hlediska synoptické situace

Z hlediska synoptické situace dělíme bouřky na frontální a nefrontální. V následujícím textu kapitoly 1.2 vycházíme především z Meteorologického slovníku [12] vydaného roku 1993. Takovéto dělení bouřek se však v dnešní době příliš nepoužívá, spíše se setkáme s dělením bouří podle jejich struktury (viz část 2.2).

1.2.1 Bouřky frontální

Frontální bouřka je taková, která se vyskytuje v oblasti atmosférické fronty a postupuje s ní. Vzniká zpravidla na studené frontě nebo studené okluzi, méně často na teplé frontě. Může se

objevit v každé denní i roční době. Podle [12] se rozlišují následující typy bouřek:

Bouřka studené fronty vzniká na čele studené fronty, kde probíhá intenzivní vytlačování teplého vzduchu vzhůru před přitékajícím studeným vzduchem. Čím je teplý vzduch s instabilním teplotním zvrstvením vlhčí, tím se vyvíjejí mohutnější Cb. Bouřky studené fronty často provází vydatné srážky, krupobití a silné nárazy větru. Mohou se vyskytnout nad libovolným terénem v kteroukoliv denní dobu, nejintenzivnější však bývají v odpoledních hodinách a v členitém terénu. Mohou být uspořádány do pásu podél frontálního rozhraní v délce i několika stovek kilometrů. Vzhledem k častému výskytu extrémních jevů provázených prudkým ochlazením je na jejich výskyt a vývoj soustředěna velká pozornost v povětrnostní službě.

Zimní bouřka je u nás řídce se vyskytující jev v zimním období (prosinec až únor), spojený nejčastěji s přechodem rychle postupující výrazné studené nebo podružné studené fronty. Při zimních bouřkách zaznamenáváme obvykle jen jeden až dva silné výboje blesků, provázené převážně náhlým zesílením větru a silným sněžením. Nad oceány se zimní bouřky vyskytují častěji.

Bouřka teplé fronty vzniká vždy před čarou fronty. K jejímu vzniku je nutným předpokladem alespoň podmíněná instabilita atmosféry v teplém vzduchu, existence výstupných pohybů podél frontálního rozhraní a radiační ochlazování horních vrstev frontální oblačnosti, které má za následek růst instability. Bouřka teplé fronty se u nás nevyskytuje příliš často.

1.2.2 Bouřky uvnitř vzduchové hmoty

Bouřka nefrontální, neboli bouřka uvnitř vzduchové hmoty, se vyskytuje v instabilní vzduchové hmotě a není spojena s atmosférickou frontou. Vzniká zejména následkem termické konvekce v místech příznivých pro rychlé oteplování velkých objemů vzduchu, např. v některých částech horských oblastí nebo kopcovitých terénů, v průmyslových oblastech a nad velkými zastavěnými plochami. Nefrontální bouřky bývají také důsledkem uspořádané konvekce.

Kvazifrontální bouřka patří mezi bouřky ve studené instabilní vzduchové hmotě. Souvisí s uspořádanou konvekcí. Kvazifrontální bouřky zpravidla vytvářejí pásy a svými projevy se podobají bouřkám studené fronty. Postup kvazifrontálních bouřek je rychlý, cca 50 km/h. Trvají krátce, na daném místě se opakují často i několikrát za den. Mohou vznikat již v dopoledních hodinách, odpoledne zesilují, k večeru a během noci slábnou. Nejčastěji se vyskytují v jarním období. Můžeme mezi ně zařadit také bouřky, které se tvoří na čarách instability.

Advekční bouřka se tvoří v oblasti studené advekce za studenou frontou. Její vznik je podmíněn existencí absolutní instability atmosféry alespoň do výšky kondenzační hladiny a podmíněnou instabilitou atmosféry do výšky alespoň 4 až 6 km.

Konvekční bouřka je bouřka uvnitř instabilní vzduchové hmoty, jejíž rozhodující příčinou je termická konvekce vzniklá následkem nerovnoměrného ohřívání zemského povrchu.

Vyskytuje se v době denního teplotního maxima za pěkného teplého počasí a má výlučně lokální charakter. Může být velmi intenzivní s velkým počtem blesků, se silným deštěm, popř. krupobitím. Rychlost jejího postupu je malá, cca 5 až 15 km/h.

Orografická bouřka je spojena se zesílením konvekce vlivem orografie, zejména termické konvekce nad osluněnými svahy. Vznik orografické bouřky ovlivňují dále výstupná proudění na návětrí, konvergence horských a údolních větrů, zvýšená mechanická turbulence vedoucí za vhodných podmínek ke vzniku spontánní konvekce a zpravidla vyšší vlhkost vzduchu v horských oblastech.

1.3 Podmínky pro vznik bouřek z hlediska stability ovzduší

Takovými podmínkami nazýváme termodynamické a dynamické charakteristiky atmosféry, které mají vliv na vývoj konvekčních oblaků. Vývoj konvekční oblačnosti je spojen s existencí plošně omezených výstupných i kompenzačních sestupných proudů vzduchu v atmosféře, jejichž vertikální rychlost je řádu jednotek až desítek metrů za sekundu. Vznik kupovitých oblaků tedy podmiňuje existence procesu vyvolávajícího vznik výstupných konvekčních pohybů, který je prvním impulsem pro jejich další vývoj. Dalším předpokladem je takový vertikální profil teploty a vlhkosti v troposféře, jenž dále podporuje zrychlení vzniklého výstupného proudu, přičemž vzduch proudící vzhůru je dostatečně teplý a vlhký, aby zajistil přísun vody potřebné pro vývoj oblaku [9].

Proces, při němž se vyvíjejí vzestupné a sestupné pohyby vzduchu, nazýváme atmosférickou konvekcí. Představuje důležitý mechanismus vertikální výměny tepla a vlhkosti v troposféře i spodní stratosféře. Atmosférická konvekce je způsobena archimedovskými vztlačkovými silami, které vznikají následkem horizontálních teplotních nehomogenit v atmosféře nebo při obtékání různých orografických překážek, na frontálních plochách či v důsledku prostorově proměnné drsnosti zemského povrchu [12]. Síla vztlaku \mathbf{B} přispívá k vertikálnímu zrychlení vzduchové částice a můžeme ji vyjádřit vztahem

$$\mathbf{B} \equiv \mathbf{g} \frac{T' - T_e}{T_e}, \quad (1.1)$$

ve kterém \mathbf{g} představuje tíhové zrychlení, T' je teplota uvažované vzduchové částice a T_e teplota jejího okolí. V závislosti na daných podmínkách může vztlak nabývat jak kladných, tak záporných hodnot [3].

Výstupné konvekční pohyby souvisejí s vertikálním rozložením hustoty vzduchu, kdy vztlačková síla působí směrem vzhůru na daný objem vzduchu, jehož hustota je menší než hustota v jeho okolí. Stoupající vzduch se potom vlivem poklesu atmosférického tlaku s výškou rozpíná a ochlazuje. Pokles teploty vystupujícího vzduchu je spojen s poklesem hodnoty napětí nasycení vodní párou, relativní vlhkost ve vystupujícím vzduchu tedy roste. Nedosáhne-li stoupající vzduch stavu nasycení vodní párou, hovoříme o **bezoblačné** nebo též **suché konvekci**. Meteorologicky významnější jsou však konvekční pohyby, při nichž je dosaženo nasycení vzduchu vodní párou a dochází tak k vývoji kupovité konvekční oblačnosti. V tomto případě používáme pojem **vlhká** nebo **oblačná konvekce** [9].

Stabilitní podmínky v atmosféře, neboli charakteristiky různých druhů teplotního zvrstvení, ovlivňují rozvoj vertikálních pohybů a intenzitu vertikálního promíchávání vzduchu. Hodnocení stabilitních podmínek v atmosféře lze provádět např. metodou částice, metodou vrstvy či metodou vtaňování (podrobněji viz [6, 9, 19]). V následujícím textu uvažujeme kritéria, která určují stabilitní podmínky ve vztahu k chování suché vzduchové částice¹. Předpokládáme také, že atmosféra je ve stavu hydrostatické rovnováhy.

Mírou teplotního zvrstvení ovzduší je tzv. **lokální vertikální gradient teploty** γ definován vzorcem

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1.2)$$

kde T představuje teplotu vzduchu a z je výška [6]. Porovnáním vertikálního teplotního gradientu γ a suchoadiabatického gradientu γ_a (v nenasyčeném vzduchu) nebo nasyceně adiabatického gradientu γ_s (v nasyceném vzduchu) lze zjistit, zda se jedná o teplotní zvrstvení atmosféry stabilní, indiferentní či instabilní (labilní). Kritéria vertikální stability můžeme vyjádřit následujícími relacemi:

- $\gamma > \gamma_a > \gamma_s$... absolutně instabilní zvrstvení, tj. instabilní stav atmosféry pro nenasyčený i nasycený vzduch,
- $\gamma = \gamma_a > \gamma_s$... indiferentní zvrstvení vzhledem k nenasyčenému vzduchu a instabilní zvrstvení pro nasycený vzduch,
- $\gamma_a > \gamma > \gamma_s$... podmíněně instabilní zvrstvení, tj. instabilní vůči nasycenému a stabilní pro nenasyčený vzduch,
- $\gamma_a > \gamma = \gamma_s$... stabilní zvrstvení vůči nenasyčenému vzduchu a indiferentní vzhledem k nasycenému vzduchu,
- $\gamma_a > \gamma_s > \gamma$... absolutně stabilní zvrstvení, tj. stabilní stav atmosféry pro nenasyčený i nasycený vzduch.

Obdobná kritéria lze zapsat prostřednictvím potenciální teploty Θ v nenasyčeném vzduchu a adiabatické ekvivalentní potenciální teploty Θ_e v nasyceném vzduchu (viz např. [6, 9]). Při stabilním zvrstvení se vertikální pohyby v atmosféře a promíchávání vzduchu tlumí, naopak při instabilním teplotním zvrstvení může malý počáteční impuls vést k rozvoji významných vertikálních pohybů [6]. Instabilita atmosféry vytváří podmínky pro konvekci v atmosféře, pro intenzivní promíchávání vzduchové hmoty, vertikální přenos hybnosti, tepla, vodní páry a různých příměsí. K příčinám vzniku instability obecně patří vertikálně nerovnoměrná advekce ve vzduchové hmotě či přehřívání zemského povrchu slunečním zářením. Ve vrstvách oblačnosti se může instabilita vyvíjet např. působením vyzařování na jejich horní hranici [12].

Vlastnosti stoupajícího oblačného vzduchu se však liší od vlastností adiabaticky izolované vzduchové částice. V systémech oblačného měřítka není možné dodržet předpoklad hydrostatické rovnováhy. Navíc u všech konvekčních oblaků dochází v různých partiích oblaku

¹Vzduchovou částicí nazýváme určitý objem vzduchu, který je dostatečně velký na to, abychom mohli zanedbat jeho molekulovou strukturu a zároveň natolik malý, že v každém okamžiku můžeme uvnitř něj zanedbat prostorové změny hodnot meteorologických prvků [6]. Jeho pohyb nevyvolává v okolním vzduchu kompenzační pohyby a při svém přemístění se nemísí s okolím. Tlak vzduchu v částici se okamžitě přizpůsobuje tlaku vzduchu v jejím okolí. Chování vzduchové částice je určeno adiabatickými procesy [9].

k promíchávání oblačného vzduchu se vzduchem v jeho okolí. Tato výměna má vliv nejen na teplotu a vlhkost vystupujícího vzduchu, ale mění i jeho hybnost a snižuje jeho vztlak. Metodu vtahování, která výše zmíněnou skutečnost bere v úvahu, lze proto s dobrými výsledky využít při určování výšky vrcholů konvekčních oblaků (podrobněji viz [6, 9]).

Rozšířením úvah o vertikální teplotní stabilitě je tzv. **symetrická instabilita atmosféry**, kdy posuzujeme stabilitu vzduchové částice vzhledem k šikmému vychýlení z rovnovážné polohy. Kromě vertikálního teplotního zvrstvení řízeného silou archimedovského vztlaku je tedy třeba uvažovat i vliv horizontálního silového působení a posoudit inerční stabilitu částice [9]. **Potenciální** či **konvekční instabilita atmosféry** studuje změnu stability, k níž dochází při vertikálním adiabatickém přemístění celé horizontální vrstvy vzduchu. Podmínky potenciální stability jsou důležité v případě labilizace dané, původně stabilní, vzduchové vrstvy při jejím vertikálním přemístění (např. orograficky podmíněném) nebo při sestupných pohybech velmi stabilních vrstev a vzniku inverze sesedáním (subsidence). Původně indiferentní zvrstvení zůstává při vertikálních přesunech nenasyčených vzduchových vrstev zachováno. Potenciální stabilita se tedy může projevit jako účinný mechanismus např. při vzniku oblaků v hornatém terénu nebo u velkých konvekčních systémů (viz část 2.2.4) [9].

Kapitola 2

Konvekční bouře

Konvekční bouře nad pevninou představují jeden z nejdůležitějších povětrnostních prvků v teplé polovině roku. Jak je uvedeno v [9], termín konvekční bouře označuje souhrn konvekčních procesů a jevů, jež probíhají při vývoji vertikálně mohutných srážkových konvekčních oblaků druhu Cb. Ty mohou nabývat nejrůznějších forem.

2.1 Konvekční oblak a jeho dynamika

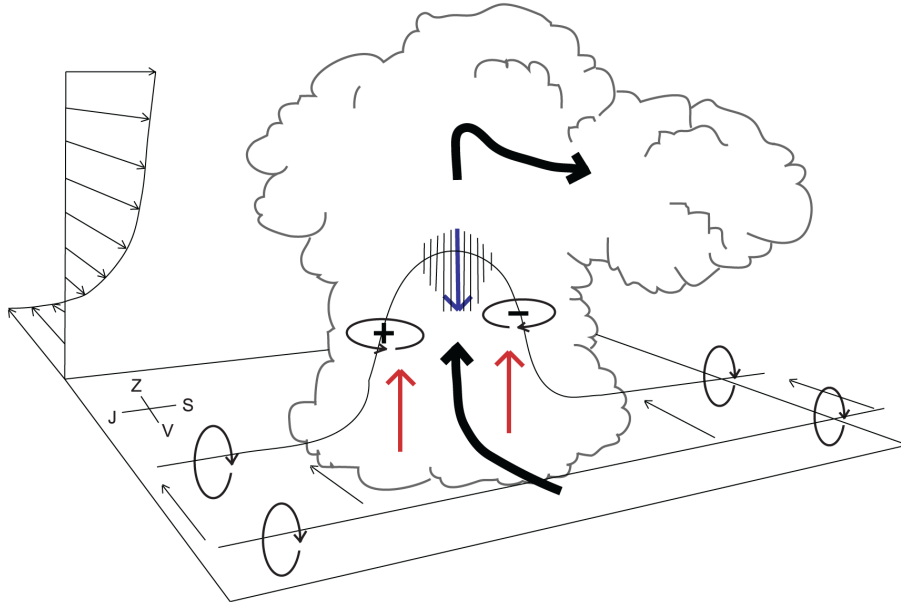
Konvekční oblaky vznikají nebo jsou modifikovány konvekcí. Mezi typické zástupce patří oblaky druhu *Cumulus* a *Cumulonimbus* [12]. Vyvíjejí se v prostředí s podmíněně instabilním teplotním zvrstvením. Výstupná rychlost v těchto oblacích je mnohem větší a vývoj srážkových částic probíhá mnohem rychleji než u srážkových vrstevnatých oblaků. Výrazně se liší také z hlediska vnějšího vzhledu, horizontálního rozsahu a relativní důležitosti různých mikrofyzikálních procesů. Základna konvekčních oblaků leží ve spodním oblačném patře, jejich vrcholky mohou přesahovat výšku 15 km, v některých případech tedy pronikají tropopauzou do spodní stratosféry. Výstupné proudy v Cb dosahují rychlostí řádově 10 m.s^{-1} , typické hodnoty vodního obsahu se pohybují mezi $1,5$ až $4,5 \text{ g.m}^{-3}$, někdy i více [9].

V našich zeměpisných šířkách je bouřkový oblak z mikrostrukturálního hlediska vždy smíšeným (přínejmenším ve svých středních partiích). V blízkosti spodní základny většinou obsahuje pouze vodní kapičky, zatímco jeho vrcholky mají často charakter čistě ledového oblaku. Společná existence ledových částic a kapek přechlazené vody ve značné části celkového objemu Cb umožňuje vznik intenzivního vypadávání srážek a zřejmě podmiňuje i projevy bouřkové elektřiny [1].

Působením nehydrostatických tlakových sil vzniká uvnitř oblaku proudění s gradienty rychlosti proudění o různém směru a velikosti. Díky změnám v rychlosti proudění vznikají víry, jejichž rozměry řádově odpovídají charakteristickým rozměrům oblaku. Při popisu proudění v oblaku a jeho okolí můžeme využít koncept vorticity proudění [9]. Vorticity neboli vírnatost je vektorová veličina, která charakterizuje vířivou strukturu proudění dané tekutiny. V dynamické meteorologii se většinou uvažují víry synoptického měřítká s přibližně vertikální osou [6]. Pro dynamiku mohutných konvekčních oblaků je však nutno brát v úvahu třírozměrné pole proudění a tedy i všechny tři složky vektoru relativní vorticity ω [9]

$$\omega = \nabla \times \mathbf{v} = i\eta + j\zeta + k\xi, \quad (2.1)$$

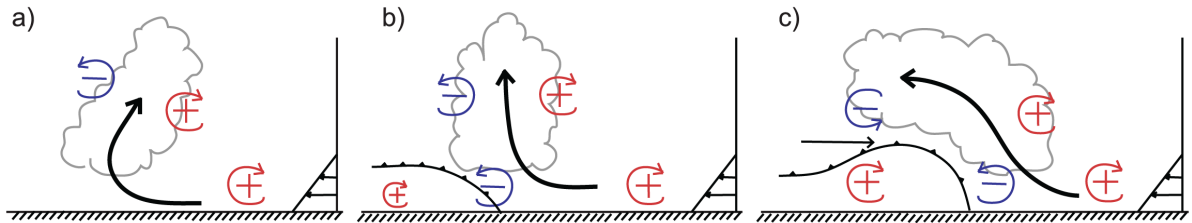
která je dána rotací vektoru rychlosti proudění \mathbf{v} , jednotkové vektory ve směru os kartézského systému souřadnic x, y, z jsou označeny $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ a η, ζ, ξ jsou příslušné složky vektoru relativní vorticity ve směru těchto os. Kolem vystupující nebo sestupující vzduchové částice vzniká prstenec horizontální vorticity, který souvisí se symetrickým horizontálním gradientem síly vztaku a je jedním z důležitých a zajímavých kroků vývoje výřivých pohybů v konvekčním oblaku. Vorticitata má významný vliv také na strukturu konvekčních bouří. Na obr. 2.1 můžeme vidět případ, kdy se horizontální vírová trubice spojená s konvekčním oblakem od horizontály odkloní. Část rotace tak získává vertikální složku, jež se potom může projevit např. v nálevkovitém oblaku nebo tornádech [9].



Obrázek 2.1: Schématické znázornění transformace horizontální vorticity prostředí na vertikální vorticitu v oblaku (upraveno dle [3] a [9]). Oblak se v tomto případě vyvíjí v západním proudění, kde jeho rychlost roste s výškou a nemění směr. Vertikální profil rychlosti znázorněný na obrázku odpovídá proudění relativně k pohybujícímu se oblaku. Černé šipky vyznačují proudění vzduchu relativně k bouři. Horizontální vorticitata okolního vzduchu je znázorněna linií v severojižním směru, která leží vně oblaku a jejíž rotace je vyznačena kruhovými šipkami. Při interakci s výstupným proudem v oblaku dochází k náklonu linie s horizontální vorticitou ve smyslu vyznačeném na obrázku. Vzniká tak dvojice oblastí vertikální vorticity s opačnou orientací. Barevné šipky potom ukazují směr vynuceného výstupu a sestupu vzduchu.

Při vzniku konvekční oblačnosti a při jejím následném formování tedy hrají podstatnou roli změny vektoru větru s výškou. Mají vliv na strukturu bouřkových systémů, míru jejich organizovanosti a délku trvání [15]. Existují dva základní mechanismy, kterými může vertikální stříh větru působit na vývoj konvekčních oblaků. První se vztahuje ke schopnosti takové interakce výstupného proudu v konvekčním oblaku s okolním stříhem větru (viz obr. 2.1), že dochází k vývoji supercelární bouře (viz část 2.2.3). Druhý z nich souvisí se schopností gust fronty vyvolávat vznik nových buněk (obr. 2.2 a část 2.2.2). Oba tyto mechanismy jsou silně nelineární. Vliv vertikálního stříhu větru může být různý, musíme jej brát v úvahu také v souvislosti s velikostí hodnoty CAPE (viz část 3.1.1) [9]. Výukový program COMET [37]

se mj. zabývá právě problémem modelování vlivu vertikálního stříhu větru a veličiny CAPE na vývoj a strukturu konvekčních bouří.



Obrázek 2.2: Vliv vertikálního stříhu větru a výtoku chladného vzduchu na vývoj nového výstupného proudu (upraveno dle [3] a [9]). Výstupný proud je na schématu reprezentován černou šipkou. Gust fronta je znázorněna frontálním symbolem a ohraničuje výtok chladného vzduchu z jiné bouře. Vertikální profil větru je zobrazen v pravé části schématu. Kruhové šipky se znaménkem plus nebo minus znázorňují směr rotace horizontální vorticity. a) Vertikální stříh větru přispívá ke kladné horizontální vorticitě a výstupný proud se naklání. b) Cirkulace generovaná výtokem chladného vzduchu kompenzuje působení stříhu větru a výstupný proud se vyvíjí vertikálně. c) Působením gust fronty začíná převažovat záporná horizontální vorticity rozhraní studeného vzduchu, která vyvolává sklon výstupného proudu. Tenká šipka v tomto schématu značí zadní vtok do bouře.

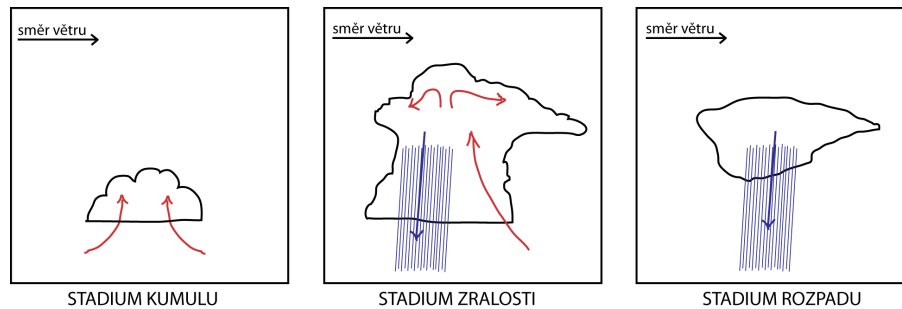
2.2 Klasifikace konvekčních bouří

V následujících částech této kapitoly budeme popisovat jednotlivé základní typy konvekčních bouří podle jejich struktury, tzv. koncepční modely. Vycházeli jsme přitom hlavně z knihy Fyzika oblaků a srážek [9] a z monografie Severe convective storms [3]. Toto rozdělení pomáhá při popisu vnitřní struktury a chování bouře a umožňuje lepší odhad jejího dalšího vývoje. Většina bouří prochází během svého vývoje různými změnami, zařazení bouře do dané kategorie se proto vztahuje pouze k určitému intervalu v životě bouře. Struktura konvekčních bouří závisí především na instabilitě teplotního zvrstvení a na stříhu větru.

2.2.1 Jednoduchá konvekční buňka

Konvekční pohyby vzduchu jsou často uspořádány do určitých jednotek, tzv. konvekčních buněk, pro něž je charakteristická oblast výstupného pohybu a vývoj oblasti kompenzačního sestupného pohybu vzduchu, který souvisí s vypadáváním srážek. Jednoduchá konvekční buňka je nejjednodušším typem konvekční bouře a obecně se považuje za jejich elementární jednotku. Podle [1] dosahují horizontální rozměry těchto buněk obvykle desítek metrů až několik kilometrů. Jejich životnost dosahuje většinou 30 až 50 minut [35]. Bouřka se pohybuje poměrně pomalu ve směru průměrného vektoru větru vrstvy 700–500 hPa [34]. V životním cyklu konvekčních buněk můžeme rozeznat tři vývojová stadia (viz obrázek 2.3): stadium kumulu, stadium zralosti a stadium rozpadu, kterými bouře plynule prochází (viz např. [1, 3, 9, 19]). Jednotlivé vývojové fáze jednoduché konvekční buňky lze rozeznat pomocí údajů radarové odrazivosti (viz [34, 37]), jak je vidět na obr. 2.4. Tento jednoduchý model dobře

vystihuje jak chování jednoduchých Cb, tak i vývoj konvekčních buněk tvořících složitější multicelární bouři.



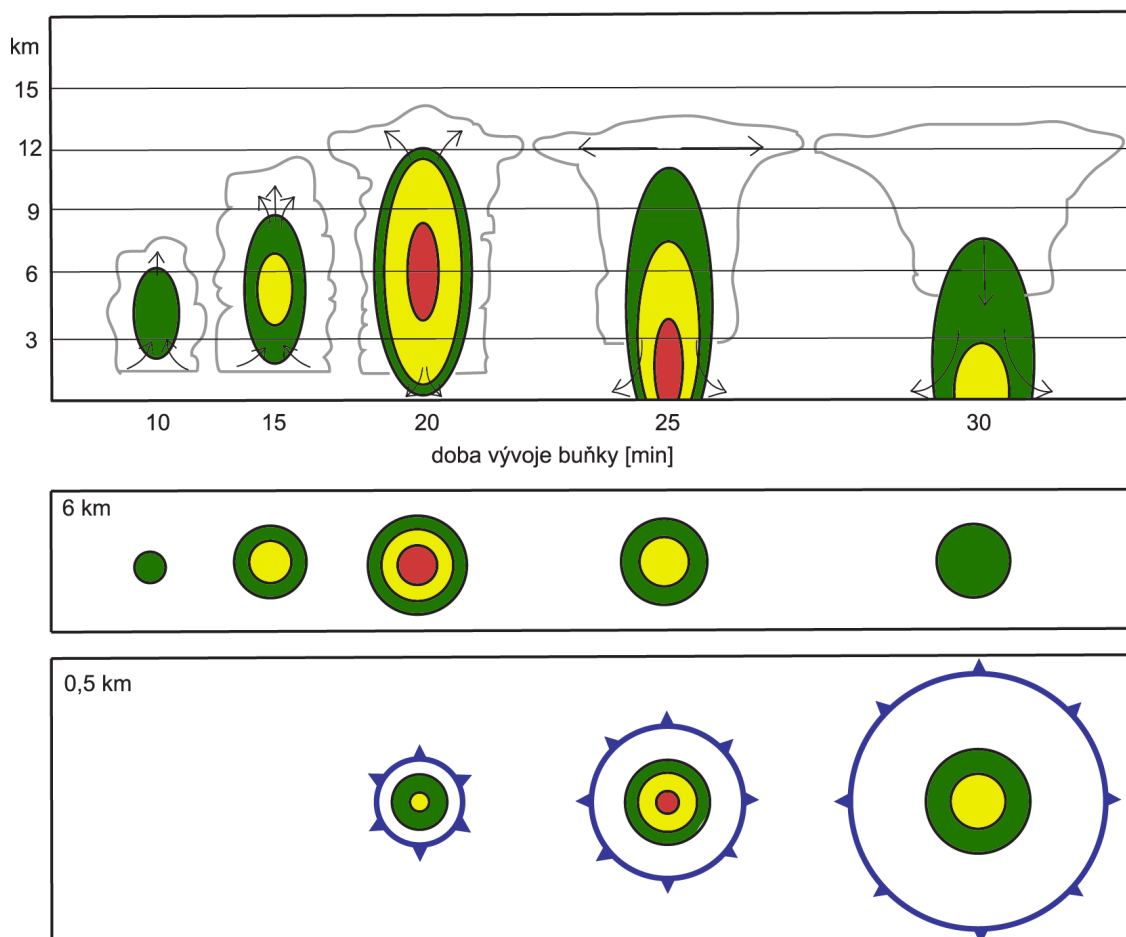
Obrázek 2.3: Schematické znázornění vývojových stadií jednoduché konvekční buňky (upraveno dle [3]). *Stadium kumulu je charakteristické převládajícím výstupným proudem, jehož vertikální rozsah odpovídá vertikálnímu rozsahu oblaku. Ve stadiu zralosti je současně přítomen výstupný a sestupný proud v různých částech oblaku. Pro stadium rozpadu je typický sestupný proud, jehož vertikální rozsah odpovídá vertikálnímu rozsahu buňky.*

Pro vznik konvekčních buněk je nutné, aby vertikální teplotní gradient přesahoval určitou kritickou hodnotu, která závisí na tloušťce konvekční vrstvy a na intenzitě turbulentního promíchávání. Vlastní vývoj a tvar buněk je významně ovlivňován rychlostí a vertikálním stříhem horizontálního proudění a v neposlední řadě také vlastnostmi povrchu. Při vytváření buněčné konvekce může hrát významnou roli také ochlazování dané vzduchové vrstvy shora vyzařováním. Kromě vydatných srážek a nárazů větru se u jednoduchých konvekčních buněk většinou nevyskytují žádné významnější nebezpečné povětrnostní jevy [34].

2.2.2 Multicelární bouře

Multicely jsou nejčtenějším typem bouří ve střední Evropě. Jednoduchá konvekční buňka je základní strukturální jednotkou multicelární konvekční bouře. Multicela se skládá z několika současně se vyskytujících konvekčních buněk v různém stadiu vývoje, které se mohou navzájem ovlivňovat a navenek tvoří jednolitý bouřkový oblak. Horizontální rozměry mohou dosahovat 20–30 km nebo i více [34]. Konvekční buňky se vzájemně střídají v projevech bouřkové aktivity a někdy ji tak udržují i po relativně dlouhou dobu. Životnost celého systému je potom delší než životnost jedné buňky a může dosáhnout až několika hodin. Toto uspořádání činí vývoj multicelární bouře a směr jejího postupu obtížně předpověditelný [9]. Multicelární systémy mohou sestávat z bouří různých kategorií včetně kategorie supercel. Nejrozsáhlejší systémy multicelárního typu, jejichž horizontální rozměr alespoň v jednom směru přesahuje 100 km, zařazujeme do kategorie mezosynoptických konvekčních systémů [9].

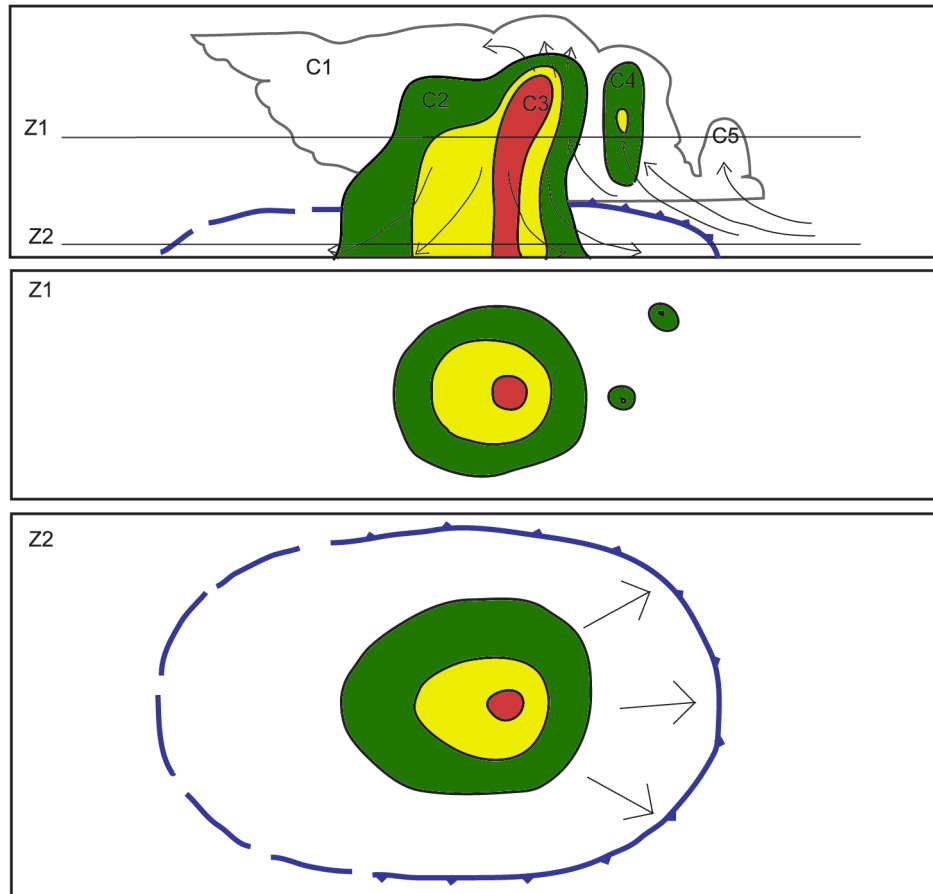
Základním mechanismem, který vyvolává postupný vznik jednotlivých buněk, je vynucený výstup teplého a vlhkého vzduchu před chladným vzduchem vytékajícím z bouře ze zralých buněk, jehož čelo má formu gust fronty (viz část 2.3.2). Okolní vzduch spodních hladin pak může vystoupit k hladině volné konvekce a vzniká nová dceřiná buňka. Takové buňky a jejich gust fronty mohou vyvolat vznik dalších buněk a vyvíjí se tak celý multicelární systém. Schopnost gust fronty vyvolat vznik nových buněk závisí především na stříhu větru



Obrázek 2.4: Schématické znázornění rozložení radarové odrazivosti v oblaku jednoduché konvekční buňky (upraveno dle [3, 9, 37]). Konvekční buňka se v tomto případě vyvíjí v prostředí se slabým stříhem větru, výstupný proud má tedy vertikální směr. Vypadávání srážek je spojeno s výtokem chladného vzduchu, jehož čelo (poloha gust fronty) je vyznačeno symbolem studené fronty. Radarová odrazivost je zde naznačena jednotlivými barvami. Horní část obrázku představuje vertikální řez oblakem. Doba vývoje od prvního echa zaznamenaného radarem je vyznačena na horizontální ose, výška oblaku nad zemským povrchem na ose vertikální. Ve spodní části obrázku jsou znázorněny horizontální řezy polem radarové odrazivosti ve výšce 6 km a 0,5 km.

a na míře instability vzduchové hmoty ve spodních hladinách. Jak uvádí [9], multicely se obvykle vyvíjejí v silně instabilním prostředí při mírném až středním vertikálním stříhu větru s charakteristickou střední hodnotou v oblačné vrstvě kolem $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na 1 km výšky.

Při studiu pohybu multicelárního systému je proto nutné jako výsledný vektor pohybu bouře uvažovat součet dvou složek. Jednu složku tvoří vektor střední rychlosti pohybu jednotlivých buněk, který je ovlivněn hlavně rychlostí větru, druhou složkou pohybu bouře je šíření systému v důsledku vzniku nových buněk na okrajích nebo v blízkosti tohoto systému, nejčastěji v oblasti gust fronty proti směru proudění ve spodních hladinách. Na rychlosti pohybu multicelárního systému potom závisí také celkové úhrny srážek, které vypadnou v daném místě [9] (viz část 2.3.1).



Obrázek 2.5: Schématické znázornění rozložení radarové odrazivosti v oblaku multicelární bouře (upraveno dle [3, 9, 37]). Oblak se skládá z konvekčních buněk označených na obrázku v horní části jako C1 až C5. Je zde zobrazen vertikální řez oblakem s prouděním vyznačeným šipkami. Aktivní část gust fronty, která iniciuje vývoj nových buněk, je označena symbolem studené fronty, neaktivní část čárkovaně. Intenzita radarové odrazivosti je naznačena jednotlivými barvami. Ve spodních dvou částech obrázku jsou znázorněny horizontální řezy polem radarové odrazivosti ve výšce Z1 a Z2 (vyznačeny v horním panelu obrázku).

Od běžných konvekčních bouří se multicela liší vyšší rychlostí vzestupných proudů a delší dobou trvání (několik hodin). Na rozdíl od jednobuněčné bouře se vyvíjí především ve frontální zóně, v důsledku čehož se pohybuje rychleji [34]. Její struktura je příčinou značné časové a prostorové proměnlivosti doprovodných jevů, čímž ji lze odlišit od supercely. Pomocí radiolokátoru je možné v každém okamžiku vývoje rozeznat několik výrazných jader vysoké radiolokační odrazivosti (cca 40–50 dBZ). Příkladem multicelární bouře z pohledu radiolokační odrazivosti může být obr. 2.5. Na družicových snímcích je patrný větší počet vertikálních výběžků horní hranice oblačnosti (angl. *overshooting top*) [12].

2.2.3 Supercelární bouře

Supercela je charakterizována jako konvekční bouře s dlouhou dobou života (několik hodin), kterou tvoří jediná velmi výrazná konvekční buňka, jež se spojitě obnovuje. Tato buňka je udržována v činnosti jediným silným rotujícím výstupným proudem, jenž je po relativně dlouhou dobu existence bouře stacionární. Tento mohutný vzestupný proud s vertikální osou rotace dosahuje vertikální rychlosti až $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [12]. Horizontální rozměr supercely je při zemi více než 20 km, zatímco rozšiřující se vrchol oblaku - kovadlina dosahuje i více než 100 km [34].

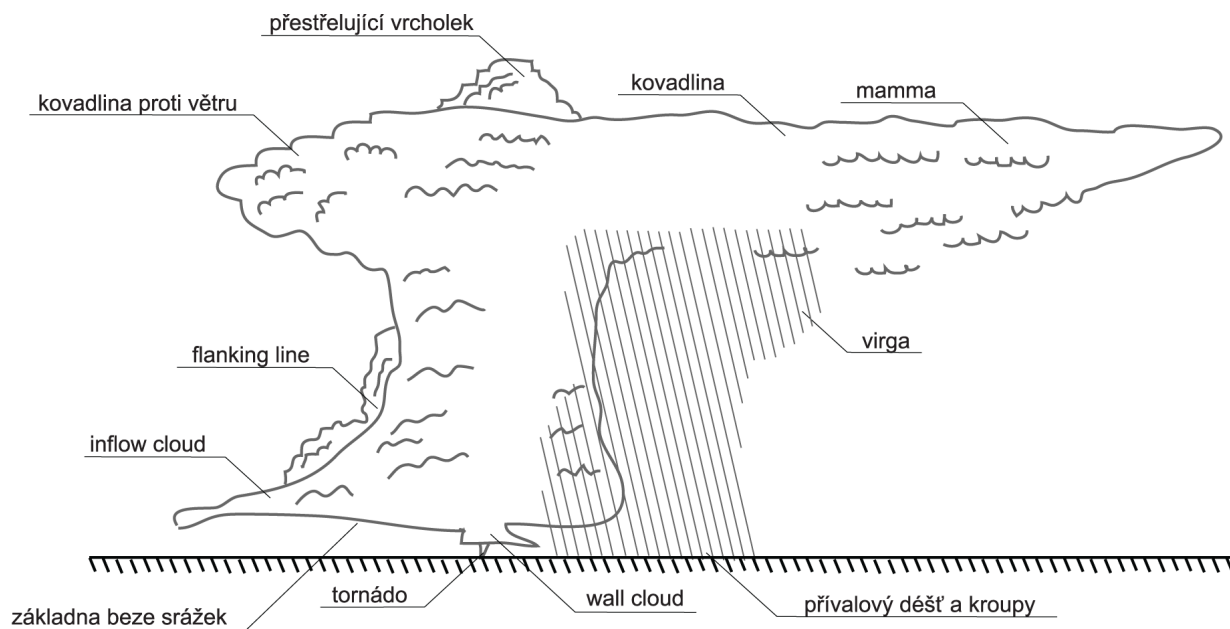
Obecně se supercely pohybují pomaleji než jiné bouře. Směr jejich pohybu se výrazně odchyluje od středního směru větru v oblačné vrstvě a nevykazuje nespojitě rysy šíření jako multicelární systémy [9]. Dalším typickým příznakem může být rozdělování buněk, tzv. *splitting* [34, 37]. Rotace, vertikální rychlost a komplikovaná struktura proudění jsou příčinou specifických projevů supercelární bouře, např. výskytu tornáda, relativně dlouhodobé produkce krup nebo tvorby obřích krup, silného přivalového deště či extrémní elektrické aktivity [35]. Supercelární struktura bouře je podporována silným stříhem větru a helicitou, která způsobuje rotaci vznikajících výstupných proudů (viz část 3.1.1).

Rozhodujícím znakem supercelárního vývoje je existence mezocyklony. **Mezocyklona** je oblast nízkého tlaku vzduchu, která se vyvíjí uvnitř oblaku a jejíž horizontální rozměr odpovídá rozsahu daného oblaku. Projevuje se jako vír s maximální řádovou hodnotou vertikální vorticity 10^{-2} s^{-1} a je detekovatelná dopplerovskými radiolokátory. Oblast rotace má typický průměr 3 až 10 km a často se nachází na jihozápadním okraji supercely [9]. Fyzikální podstata supercelární cirkulace stále není zcela zodpovězenou otázkou meteorologie.

Podle intenzity srážkové činnosti můžeme supercelární bouře rozlišit na tzv. **LP supercely** (z angl. *Low Precipitation*) se slabými nebo neviditelnými srážkami pod základnou oblačnosti, mohou ale produkovat kroupy obrovských rozměrů, **klasické supercely** a **HP supercely** (z angl. *High Precipitation*), které se vyvíjí v relativně vlhkém prostředí a postupně transformují velká množství vodní páry na vodu nebo led v podobě velmi intenzivních srážek či mohutných krupobití [9]. Bývají často doprovázeny extrémními a dlouhotrvajícími downbursty. V kombinaci poměrně pomalého pohybu supercelárního systému s doprovodnými jevy (jako např. mimořádně intenzivní elektrická aktivita či tornáda ukrytá v dešti) představují HP supercely velké nebezpečí (viz [3, 9] nebo [38]).

Jak uvádí [3] nebo [9], mezi výrazné vizuální charakteristiky supercelární bouře patří tzv. přestřelující vrcholek oblaku (z angl. *overshooting top*) a rozsáhlá kovadlina po směru stříhu větru v horních hladinách, jejíž část je protažena i proti směru stříhu. Základna supercely zahrnuje oblast beze srážek a vizuálně výraznou oblast rotující oblačnosti (angl. *wall cloud*), která vystupuje ze základny oblaku směrem dolů. Je hlavní oblastí, kde může dojít k vývoji tornáda. Další charakteristiky jako pás oblačnosti na boku bouře (angl. *flanking line*) nebo výběžek oblačnosti (angl. *inflow cloud* nebo také *inflow band*), který může signalizovat sílu vtoku vlhkého vzduchu do bouře a poukazovat tedy na její nebezpečnost, jsou naznačeny na obrázku 2.6.

Bouře spadající do kategorie supercel se vyznačují zcela specifickou strukturou pole radarové odrazivosti (viz obr. 2.7). Je pro ně jednoznačně charakteristický zavěšený hákovitý výběžek zvýšené radiolokační odrazivosti (angl. *hook echo*), který obklopuje uzavřenou oblast snížené radiolokační odrazivosti (angl. *Bounded Weak Echo Region*, BWER) [9]. Na



Obrázek 2.6: Schéma vzhledu zralé supercelární bouře (upraveno dle [3] a [9]). Na tomto obrázku jsou naznačeny jednotlivé vizuální charakteristiky supercely. Uvádíme zde také obecně používaná anglická označení, pro která zatím neexistuje český ekvivalent.

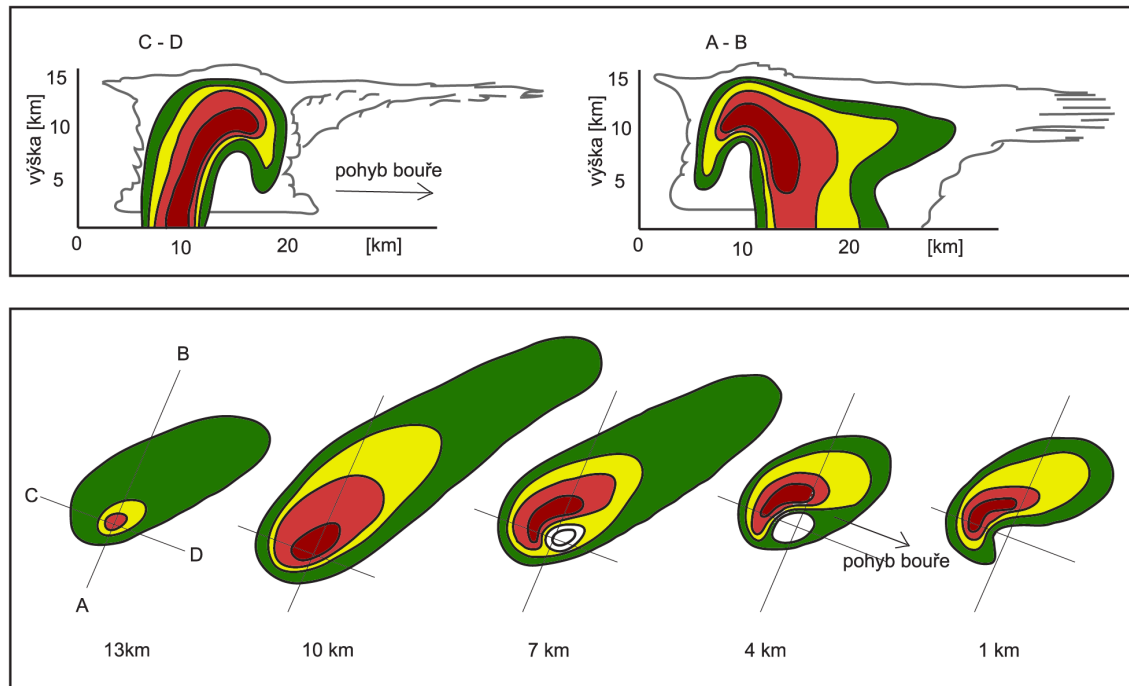
družicových snímcích jsou při slabém okolním proudění charakteristickými znaky teplotního pole horní hranice oblačnosti supercely mírně protažené koncentrické izotermy. Při silném okolním proudění se pole izoterem deformuje až do tvaru studeného hřebene v podobě podkovy na návětrné straně s teplou skvrnou uvnitř [12]. Tyto typické příznaky supercelárních bouří však mohou být patrné pouze po krátkou dobu jejich existence, někdy nemusí být pozorovány vůbec [9]. Kromě výrazné instability nebo potenciální instability je s vývojem supercel spojen hodograf (viz část 3.1.2) vykazující výrazný vertikální stříh větru a stáčení větru s výškou vpravo, zejména v nižších hladinách [34].

2.2.4 Mezosynoptické konvekční systémy

Mezosynoptický konvekční systém je soustava oblaků druhu Cb, jehož horizontální rozměr alespoň v jednom směru přesahuje 100 km. Označujeme jej zkratkou MCS (z angl. *Mesoscale Convective System*). Jsou charakteristické rozsáhlou srážkovou oblastí, bývají hlavní příčinou přívalových povodní. Nad oceánem se MCS mohou transformovat v tropické níže [9].

K vývoji MCS dochází spojením srážkových konvekčních oblaků do jednotného oblačného systému mezosynoptického měřítka. MCS se skládá z konvekční i vrstevnaté složky oblačnosti. Jeho dynamika je složitější než u jednotlivých Cb. Provází jej řada dalších jevů, které se u individuálních oblaků neprojevují. Typická doba života MCS je cca 10 hodin, přičemž kovadlina konvekční složky a vrstevnatá část MCS se mohou v některých případech vyskytovat i po několik dní [9].

Prostorové uspořádání elementů MCS je rozmanité. Základním typem jsou více méně neuspořádaný shluk oblaků (angl. *cluster*) a lineární struktura oblaků označovaná jako tzv. *squall*



Obrázek 2.7: Schématické znázornění pole radarové odrazivosti v oblaku supercelární bouře (upraveno dle [3, 9, 37]). V horní části obrázku jsou vertikální řezy supercelární bouře ve směru A-B (vpravo) a C-D (vlevo), jak je naznačeno osami v obrázcích níže. Radarová odrazivost je znázorněna jednotlivými barvami. Na obrázcích je patrná pozice BWER v oblaku. Horizontální řezy jsou vedeny ve výšce 13, 10, 7, 4 a 1 km.

line. Speciální a pravděpodobně nejintenzivnější ve svých projevech jsou tzv. mezosynoptické konvekční komplexy (angl. *Mesoscale Convective Complexes*) (podrobněji viz [9]). MCS jsou důležitým propojením atmosférické konvekce s atmosférickou cirkulací většího měřítká.

2.3 Klasifikace doprovodných jevů

Každou konvekční bouři zpravidla doprovází nebezpečné meteorologické jevy - elektrické výboje, nárazový vítr, přívalové deště či krupobití. Mají malý prostorový rozsah, ale vyznačují se prudkým a rychlým vývojem. Tyto doprovodné projevy se zřídka vyskytují samostatně, proto je vždy nutné předpokládat jejich možné kombinace. Je také třeba zohlednit konkrétní situaci a prostředí, v němž se nacházíme.

2.3.1 Atmosférické srážky

Přívalový déšť

Déšť velké intenzity má v našich oblastech převážně krátké trvání (do 30 minut) a malý plošný rozsah, což souvisí s dynamikou konvekční oblačnosti. Silné přeháňky, spojené s bouřkovou činností, jsou v letním období poměrně častým jevem. Situace se však stává nebezpečnou

v případě, kdy je bouřková buňka mimořádně aktivní a ve velmi krátkém čase (řádu desítek minut) z ní vypadne extrémní množství srážek, které pak nestačí ze zasažené oblasti odtékat. Bouřková oblačnost se také může zorganizovat do podoby většího množství bouřkových buněk, které opakovaně procházejí nad přibližně stejnou oblastí, kde dochází k velmi nebezpečné kumulaci konvekčních srážek - tzv. *train effect*. Příkladem může být známá situace z července 1998 v oblasti Orlických hor [13]. Oba zmiňované případy mohou způsobit prudké rozvodnění malých toků (dokonce i suchých koryt nebo terénních rýh) či velké zatížení kanalizačních sítí. Může tak dojít k tzv. **přívalovým povodním**. Nejnebezpečnější jsou v horách, kde se vlivem výrazně sklonitého terénu zvyšuje jejich rychlost a ničivost, přičemž dochází k sesuvům bahna a kamení [33]. Způsobené škody potom závisí zejména na úrovni trvalé připravenosti, na provedení protipovodňových opatření bývá málo času.

Kritéria pro přívalový déšť nejsou jednotná. Obvyklá intenzita srážek v bouřkách na území ČR je 10 až 40 mm.h⁻¹, výjimečně však mohou srážkové úhrny dosáhnout více než 100 mm.h⁻¹. V Systému integrované výstražné služby (viz kapitola 4) se vydává výstraha vysokého stupně nebezpečí na Bouřky s doprovodnými jevy v případě, kdy srážkový úhrn překročí hodnotu 25 mm.h⁻¹ (nebo 35 mm/6 h) a extrémní stupeň nebezpečí hrozí, pokud je překročeno 70 mm/3 h (příp. 80 mm/6 h). Největší množství srážek přívalového charakteru u nás spadlo během 1,5 hodiny 25. května 1872 v Mladoticích (Plzeň-sever) - 237 mm a 1. července 1987 v oblasti Jílovského potoka na Děčínsku - 195 mm. V Olešnici na Blanensku bylo naměřeno 15. července 2002 171 mm/cca 2 h [33]. Za nejvyšší hodinový srážkový úhrn se považuje hodnota 116,6 mm ze stanice Hamry (okr. Chrudim) ze dne 3. září 1956. Z blízkého okolí ČR jmenujme stanici Fussen (Bavorsko), kde spadlo 25. května 1920 během 8 minut 126 mm [12].

Krupobití

Kroupy jsou kusy ledu různých tvarů o průměru větším než 5 mm. Vznikají v Cb namrzáním kapek přechlazené vody a přímým ukládáním molekulární vodní páry na ledových částicích v průběhu jejich pohybu v mohutných výstupných a sestupných vzdušných proudech uvnitř bouřkových oblaků. V řezu pak mohou mít v závislosti na mechanismu růstu střídající se vrstvy krystalického a amorfního ledu. Jak je uvedeno v [9], růst krup probíhá v teplotním intervalu přibližně od -10 °C do -25 °C, což odpovídá vertikálnímu rozsahu kolem 2,5 km.

Vypadávání krup neboli krupobití je poměrně běžným jevem doprovázejícím bouřky. Trvá zpravidla jen několik minut, výjimečně i půl hodiny, a zasahuje obvykle jen omezenou oblast. V jeho důsledku vznikají značné hospodářské škody především na zemědělských plodinách. Krupobití začíná být nebezpečné tehdy, když se vyskytnou kroupy o průměru větším než cca 2 cm nebo když je zasažena rozsáhlejší plocha, přičemž se největší kroupy vyskytují zpravidla až v závěru krupobití. V některých případech mohou vypadávat kroupy o průměru nad 5 cm (rekord v ČR je cca 12 cm) [33]. Mohou tak způsobit významné hmotné škody či vážná zranění. Největší úředně ověřená kroupa o hmotnosti 766 g a obvodu 44 cm spadla za bouřky v Kansasu (USA) dne 5. září 1970 [12].

2.3.2 Silný vítr

Nárazovitý vítr

Nárazový vítr je podle [12] vítr krátkodobě měnící rychlost o více než $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (není normováno) nebo odklon směru o více než 45° po dobu alespoň 1 s, ne však více než 20 s. Nejčastěji se prudký nárazovitý vítr za bouřek vyskytuje na jejich čele, těsně před nástupem srážek.

Húlava

Húlavou budeme v našem případě rozumět náhlé zvýšení rychlosti větru, který je značně nárazovitý a často mění směr. To může být způsobeno přibližováním bouřky nebo silně přeháňky, podobnou situaci lze pozorovat před přechodem atmosférické fronty [12]. Rychlost větru dosahuje v nárazech 15 až $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ojediněle i více [33].

Downburst

Downburstem je označován extrémně silný sestup „kapsy“ studeného vzduchu uvnitř konvekčních bouří, která se po dopadu na zemský povrch začne rychle „rozlévat“ do okolí. Tento jev je vyvolán lokálním propadem chladného vzduchu. Vzniká nahromaděním velkého množství krup v horní polovině oblaku, tento objem vzduchu se pak v jistém okamžiku začne propadat k zemi. Táním ledu a odpařováním kapek zde obsažených dochází k jeho prudkému ochlazení, tím se tato „kapsa“ stane značně těžší než za normálních podmínek a díky tomu se zvětší i její pádová rychlost. Destruktivní účinek je pak umocněn vyšší hustotou chladného vzduchu, příp. přítomností velkého množství krup. Downburst zpravidla nedopadá kolmo na zemský povrch, díky pohybu mateřské bouře dopadá mírně šikmo ve směru jejího postupu [35].

Downburst je příčinou vzniku ničivých divergujících větrů u zemského povrchu [12]. Jsou pro něj typické intenzivní přívalové srážky nebo krupobití [33], bývá také doprovázen velmi prudkým zesílením větru trvajícím zpravidla 10 až 15 minut. Vítr během svého působení nemění výrazněji směr, může však být pozorována rotace části jevu kolem horizontální osy. Nejprudší nárazy větru jsou právě na čele downburstu šířícího se po zemském povrchu, které bývá někdy označováno jako **gust fronta**. Její přechod je doprovázen náhlým zvýšením větru (húlavou). Postup a chování gust fronty může být rozhodující pro vznik srážkové konvekce nebo prodloužení existence organizovaného konvekčního systému (viz obr. 2.2).

Vertikální mohutnost rozlévajících se studeného vzduchu bývá až 1 km. Horizontální průměr tohoto jevu je od několika metrů až po desítky kilometrů [12]. Stopa škod na zemském povrchu může být stejně široká, její délka ale závisí na době trvání jevu a rychlosti postupu bouře, může tak dosáhnout až několika desítek kilometrů. Míra poškození zasaženého území bývá zpravidla poněkud nižší ve srovnání se středně silnými tornády, avšak díky rozsáhlejší zasažené ploše mohou být celkové škody vyšší.

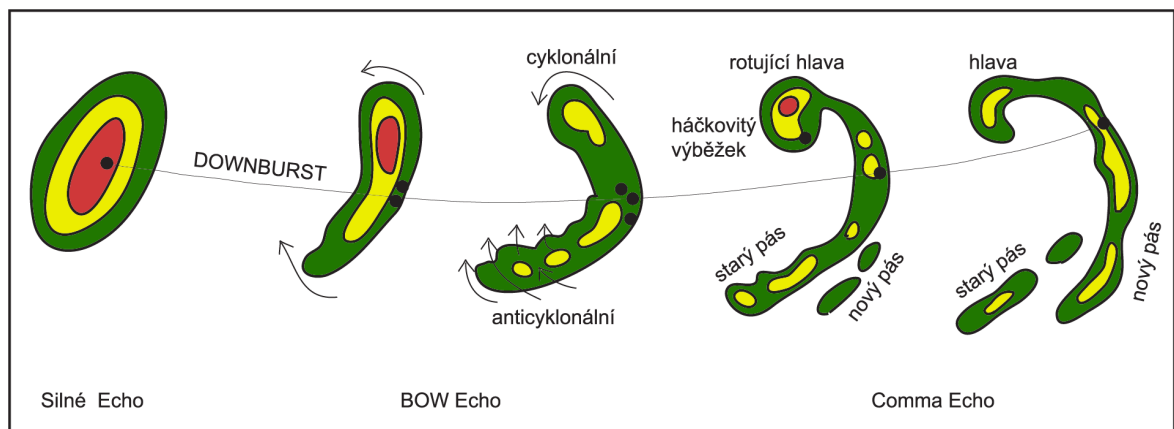
Podle horizontálního rozsahu ničivých větrů se downburst dělí na macroburst a microburst. **Makroburst** má horizontální průměr přesahující 4 km, ničivé větry trvají zpravidla 5 až 30 minut a dosahují rychlosti až $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. **Mikroburst** nepřesahuje horizontální průměr 4 km a ničivé větry trvají asi 2 až 5 minut, dosahují rychlosti až $75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [12]. Jde o plošně omezený a prudký jev, který má na zemském povrchu potenciál působit škody obdobné tornádům.

Detekce microburstu je díky malým rozměrům a krátkému trvání velmi obtížná. Je zvláště nebezpečný v leteckém provozu, kde již způsobil řadu vážných dopravních nehod.

Derecho

Derecho (ze španělštiny "rovný, přímý") je podle [38] rozsáhlá konvekce indukovaná dlouhotrvající větrná bouře s prudkým větrem vanoucím přímočaře. Silný vítr v derechu je zapříčiněn shlukem několika downburstů. Vyskytuje se nejvíce v letních měsících (na severní polokouli hlavně v červenci), může se ale objevit v kteroukoliv denní i noční hodinu v jakémkoliv ročním období. Tento jev trvá nejčastěji několik hodin, v některých případech i více než 18 hodin, a zasahuje rozsáhlé území, na kterém působí obrovské škody.

Derecho bývá nejčastěji spojováno s MCS a případem, kdy se rychle pohybující pás silných konvekčních bouří formuje do oblouku, tzv. *bow echo* (obr. 2.8). Bow echo je definováno jako pás konvekčních bouří s cyklonálním zakřivením (na severní polokouli), která se může vyskytovat jako izolovaný či vícenásobný jev podél squall line. Většinou se formuje za podmínek, kdy CAPE i stříh větru dosahují vysokých hodnot. Jako derecho pak označujeme podle [3] konvekční systém, jenž produkuje přímočarý vítr o rychlostech větších než $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ podél celého oblouku s hlavní osou délky alespoň 400 km. Příkladem výskytu derecha v podmínkách střední Evropy může být případ z 25. června 2008.



Obrázek 2.8: Příklad plošného rozložení pole radarové odrazivosti při vývoji struktury bow echa, popř. comma echa (upraveno dle [3] a [9]). Tyto struktury jsou spojeny s vývojem silných a rozsáhlých downburstů, černé tečky naznačují možnou pozici tornáda. Intenzita radarové odrazivosti je zde znázorněna jednotlivými barvami.

Tornádo

Tornádo charakterizujeme jako silně rotující vír s přibližně vertikální osou, který se vyskytuje pod základnou konvekčních bouří. Během své existence se alespoň jednou dotkne zemského povrchu a je dostatečně silný k tomu, aby na něm způsobil hmotné škody. Klasická tornáda jsou vázána na supercely, avšak část se jich může vyskytnout i na relativně slabších nesupercelárních konvekčních bouřích.

Jak je uvedeno v [35], z typického proudění v bouři a jejím okolí v severních mírných zeměpisných šířkách vyplývá výskyt většiny tornád právě pod jádrem bouře, nejčastěji na jejím jihovýchodním okraji v oblasti beze srážek. Jeho součástí zpravidla bývá tzv. **kondenzační chobot** (nebo nálevka, trychtýř, tuba), kde se vlivem silné rotace mezi osou a okrajem tornáda udržuje tlakový rozdíl (zpravidla větší než 50 hPa). Dochází tam ke kondenzaci vodní páry a tím také ke zviditelnění tornáda [12]. V okrajových partiích větších tornád mohou občas vznikat tzv. **sekundární savé víry**, jež charakterizuje velmi krátká doba života (řádově sekundy). Rozměrově jsou drobnější s výrazně savým efektem směrem vzhůru. Jimi zasažená oblast bývá malá a silně ohraničená, mají však větší destruktivní účinky než samotné tornádo [35].

Tornáda se vyvíjejí téměř neočekávaně a výstraha před nimi bývá možná jen několik minut, výjimečně několik desítek minut, předem. Horizontální rozměry tornáda dosahují řádově jednotky až stovky metrů, doba života se pohybuje v rozmezí desítek sekund až desítek minut. Škody způsobené tornádem jsou lokalizovány na malém území, ale mohou být obrovské.

Jestliže se vír prokazatelně nedotýká zemského povrchu bez ohledu na délku kondenzačního chobotu, užívá se pro něj obecnější výraz **tromba**. **Tromba** je souhrnné označení pro všechny víry v atmosféře s nehorizontální osou rotace a rozměrem řádově jednotek až stovek metrů [12]. Patří sem jak tornádo, tak prachový nebo písečný vír - rarášek.

Rychlost horizontálního proudění v tornádu se většinou odhaduje pouze na základě způsobených škod na zemském povrchu podle tzv. **Fujitovy stupnice**. Má široké rozmezí: nejslabší stupeň tornáda F0 dosahuje rychlosti proudění 18 až 32 m.s⁻¹, nejsilnější F5 přes 120 m.s⁻¹. Nejvyšší doposud zaznamenaná rychlost, která byla naměřena pomocí mobilního dopplerovského radaru, je 142 m.s⁻¹ [9]. Rychlosti větru, uvedené u jednotlivých stupňů Fujitovy stupnice, jsou orientačními hodnotami odvozenými na základě modelů působení tlaku větru na různé materiály, stavby či konstrukce typické pro oblast Severní Ameriky. Není proto možné ji aplikovat dogmaticky na škody způsobené tornády v oblasti střední Evropy. Alternativou Fujitovy stupnice používanou v části Evropy je tzv. **stupnice TORRO** (z angl. *TORnado and storm Research Organization*), která vychází z rychlosti proudění, nikoliv ze způsobených škod. Používá se ale souběžně s Fujitovou stupnicí [9].

Smršť

Smršť je hovorové označení pro prudké a krátkodobé zesílení větru provázené ničivými účinky [12].

2.3.3 Elektrická aktivita

S existencí oblaků druhu Cb jsou spojena nejsilnější elektrická pole a největší koncentrace elektrických nábojů vyskytujících se v atmosféře. Pozoruhodnější elektrické jevy v oblacích se vždy objevují jako doprovod intenzivních srážkotvorných procesů [1]. Elektrina v oblaku totiž vzniká důsledkem indukce, vzájemných srážek a třístění vodních kapek a krystalků ledu, fázových změn vody nebo pomocí vertikálních pohybů v oblaku [12].

V Cb existují zpravidla dvě základní centra elektrických nábojů opačné polarity, kladné v horní a záporné v níže ležící části oblaku. V základně Cb se objevuje ještě podstatně slabší podružné centrum kladného náboje, které je časově i prostorově vázáno na vypadávání

srážek z oblaku. Teorií, jak dochází k separování elektrických nábojů v oblacích, je několik, žádná však nedokáže uspokojivě vysvětlit elektrickou strukturu všech druhů oblaků. Při vzniku elektrických center v oblaku se tak pravděpodobně neuplatňuje pouze jeden mechanismus, jde spíše o spolupůsobení řady různých faktorů, jejichž příspěvky závisí na fyzikálních podmínkách v oblaku a jeho okolí [1]. Mezi zmíněnými centry i pod základnou Cb existuje silné elektrické pole řádově 10^4 V.m^{-1} , tj. asi o dva řády více, než by odpovídalo vertikálně orientovanému elektrickému poli za podmínek klidného ovzduší (více viz [1]).

Blesk je elektrický jiskrový výboj doprovázený vysokou ionizací vzduchu, který vzniká při dostatečně silném elektrickém poli mezi centry kladného a záporného náboje v Cb (vnitřní blesk uvnitř bouřkového oblaku), mezi těmito centry a zemí (blesk do země) nebo mezi oblakem a stratosférou (viz část 3.2.3). Blesky významně přispívají k udržování potenciálového rozdílu mezi zemským povrchem a vyššími vrstvami atmosféry, jsou také přirozeným zdrojem oxidů dusíku [9]. Účinky blesků jsou především elektrické a představují rizikový faktor všech konvekčních bouří (podrobněji viz [1, 3, 12]).

Kapitola 3

Základní metody předpovědi bouřek

Předpovědi bouřek rozumíme podle [12] komplexní předpověď podmínek příznivých pro vývoj oblaků druhu Cb v dané oblasti. Časová a prostorová lokalizace spouštěcích mechanismů pro vznik výstupného proudu je však jednou z nejtěžších částí předpovědi konvekce. Na vyvolání výstupného proudu se může podílet mnoho atmosférických procesů, jako např. konvergence na frontálním rozhraní, orograficky podmíněný výstup nebo lokální prohřátí zemského povrchu. Nicméně nutnou podmínkou pro vývoj srážkové konvekce je alespoň podmíněně instabilní zvrstvení atmosféry v dostatečně mohutné vertikální vrstvě [34].

Metody předpovědi bouřek jsou založeny na zhodnocení fyzikálního stavu atmosféry s přihlédnutím k podmínkám nutným pro vznik mohutného kupovitěho oblaku. Jak uvádí [18] či [14], při předpovědi bouřek je nutno sledovat zejména následující faktory: teplotní zvrstvení atmosféry (určeno vertikálním teplotním gradientem γ), vertikální a horizontální rozložení vlhkosti vzduchu, konvergenci a divergenci vzdušného proudění při zemi a ve vyšších hladinách atmosféry, intenzitu uspořádaných výstupných a kompenzujících sestupných proudů, advekci vzduchu v jednotlivých hladinách a transformaci vzduchových hmot. Pro vlastní předpověď je důležité také odhadnout případný vliv orografie. Z klimatologie bouřek je známo, že v určité oblasti s typickou orografií se vyskytuje více bouřek než v jiných regionech, což pomáhá při stanovení oblastí s větší pravděpodobností vzniku bouřek. Orografie má svůj vliv také na denní chod bouřkové činnosti [34]. Většina předpovědních metod však kvůli složitosti uvažuje jen některé z těchto faktorů.

Pro předpověď jevů, které jsou z hlediska předpovědi počasí důležité a často potenciálně nebezpečné (např. právě pronikavá konvekce) se používají metody tzv. *nowcastingu* [34]. Jeho prvním krokem bývá včasné rozpoznání možnosti výskytu příslušného jevu, tj. předběžný odhad, jenž je tvořen pomocí předpovědi numerického modelu i synoptických a aerologických dat. Pro aktuální monitoring a velmi krátkodobou předpověď slouží metody dálkové detekce. Pro předpověď pravděpodobného následujícího pohybu atmosférických struktur, zjištění času příchodu nebo začátku určitého atmosférického jevu v daných lokalitách se používá metoda extrapolace. Důležitým nástrojem pro odhad nelineárního vývoje nebezpečných povětrnostních jevů se potom stávají **konceptní modely**, které jsou založeny na studiu pozorovaného chování atmosférických systémů patřících do stejné kategorie a jsou často určitým způsobem podporovány výsledky numerických simulací (např. [37]). Konceptní modely konvekčních systémů popisují jejich typickou strukturu, životní cyklus a příslušné povětrnostní jevy (viz podkapitola 2.2).

Fyzikální podstata nebezpečných konvekčních jevů je z velké míry známa na základě celé řady případových studií, četných pozorování i numerického modelování, avšak zajistit jejich přesnou předpověď je obtížné právě díky jejich rychlému nelineárnímu vývoji a malému prostorovému rozsahu. Zatím není možná přesně lokalizovaná předpověď výskytu silných konvekčních bouří, varování v časovém předstihu 1 až 2 hodin je nesnadné [9]. Jakkoliv dokonalý monitoring nebo numerický model atmosféry bude vždy zatížen chybou plynoucí mj. z velké složitosti atmosférických procesů [17]. Výstražné informace na bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy proto mají spíše pravděpodobnostní charakter.

3.1 Aerologické výstupy

Přímá aerologie je jedním z oborů meteorologie, který k výzkumu zemské atmosféry využívá radiosondy, meteorologické rakety, balóny, draky, letadla apod., jež prolétávají zkoumané vrstvy atmosféry a zároveň s sebou nesou přístroje zaznamenávající jednotlivé meteorologické veličiny. Základními a nejčastěji měřenými prvky jsou teplota vzduchu, tlak vzduchu, vlhkost vzduchu a vítr. Aerologie se však věnuje také výzkumu ozónu, atmosférické elektřiny nebo složkám dlouhovlnného záření [12]. Naměřené hodnoty meteorologických veličin v různých výškách atmosféry nám potom mj. mohou posloužit k předpovědi vhodných podmínek pro vznik konvekčních bouří.

3.1.1 Indexy stability

Údaje z aerologických měření slouží ke zhodnocení míry labilitý vzduchové masy a tedy ke stanovení pravděpodobnosti bouřek či nízké oblačnosti a mlh. Jednou z úspěšných metod předpovědi silných konvekčních (a s nimi souvisejících atmosférických) jevů je použití indexů stability. Stanovení pravděpodobnosti výskytu a vývoje bouřek v závislosti na indexech stability patří mezi statistické metody [34]. Jako indexy stability, resp. instability, označujeme číselně vyjádřené míry stability vertikálního teplotního zvrstvení atmosféry [12]. Na základě úvah vycházejících z metody částice bylo vyvinuto velké množství indexů. Jak uvádí [20], řada z nich (odvozených už v 50. letech minulého století) se používá při předpovědi konvekce i v současnosti. Tyto indexy odhadují výskyt srážkové konvekce, který předpokládáme při překročení statisticky podložené prahové hodnoty indexu. V meteorologické praxi se používají s rozličnou úspěšností, ověřené jsou často jen na území státu, kde se provozně využívají. Porovnáním různých indexů stability se zabývaly práce [7, 14, 18] nebo [20].

Nejjednodušší indexy jsou si navzájem podobné, protože vycházejí z hodnot teploty a vlhkosti vzduchu ve fixních (zpravidla standardních) izobarických hladinách [20]. Sdělují nám informaci o stabilitě nebo labilitě atmosféry, a tedy o pravděpodobnosti dne bez bouřky nebo s bouřkou. Hlavní výhoda těchto indexů spočívá v jejich přehlednosti, jednoduchosti a rychlosti odhadu podmínek pro rozvoj konvekce. Každý z níže uvedených indexů má své silné a slabé stránky. Nemůže kompletně charakterizovat stav atmosféry, protože důležité detaily teplotního zvrstvení mohou být v těchto indexech zanedbány. Zohledňují v sobě však dva hlavní faktory podporující vznik bouřek - instabilitu zvrstvení a vlhkost vzduchu v různých hladinách. Pro svoji jednoduchost a časovou nenáročnost se využívají v provozní službě. Patří mezi ně Faustův index FI , K index (nazývaný také jako Whitingův index), KO index, Showalterův index a jeho modifikace Surface-based lifted index (někdy označován pouze jako Lifted

index LI) nebo Total Totals index (velmi sledovaný zejména v USA). Podrobnější pojednání o indexech stability a jejich mezních hodnotách viz např. [19].

Na rozdíl od výše zmíněné skupiny indexů byly dále vyvinuty metody posuzující konvekční prostředí pomocí vertikálně integrovaných veličin (viz [20]). Např. konvekční dostupná potenciální energie CAPE (z angl. *Convective Available Potential Energy*) mapuje celou vrstvu prostředí, ve kterém se má bouřková oblačnost tvořit. Vypovídá tak o možné intenzitě konvekce. Představuje práci vykonanou vztakovou silou okolního prostředí na adiabaticky izolovanou vzduchovou částici, která vystupuje z hladiny volné konvekce HVK , kde její kinetická energie roste, do hladiny nulového vztlaku HNV . V této hladině má vzduchová částice maximální adiabatickou výstupnou rychlost [20]. Při jejím překročení kinetická energie částice klesá. Vzhledem k tomu, že síla vztlaku působící na částici v dané výškové hladině z je úměrná rozdílu teploty částice $T(z)$ a teploty okolí $T_e(z)$, můžeme CAPE vyjádřit jako

$$\text{CAPE} = g \int_{HVK}^{HNV} \frac{T(z) - T_e(z)}{T_e(z)} dz, \quad (3.1)$$

kde g je tíhové zrychlení [16]. Někteří autoři definují CAPE pomocí virtuální teploty a zahrnují tímto způsobem do definice opravu na vlhkost. CAPE se uvádí v jednotkách J/kg. Je jedním z prekursorů kombinujících jak vlhkost v mezní vrstvě, tak teplotní zvrstvení volné atmosféry [16]. Má tu přednost, že uvažuje celý výškový rozsah, ve kterém působí nezáporná vztaková síla. Existuje několik modifikací výpočtu CAPE (viz [16]). Od roku 2001 je počítána i jako prognostická veličina modelem ALADIN. Na termodynamickém diagramu je CAPE nad konvekční kondenzační hladinou reprezentována plochou mezi křivkou zvrstvení a nasycenou adiabatou pro tuto vrstvu (viz obrázek 3.1). Existují také různé modifikované hodnoty CAPE, které berou v úvahu např. výskyt nočních inverzí (podrobněji viz [16]).

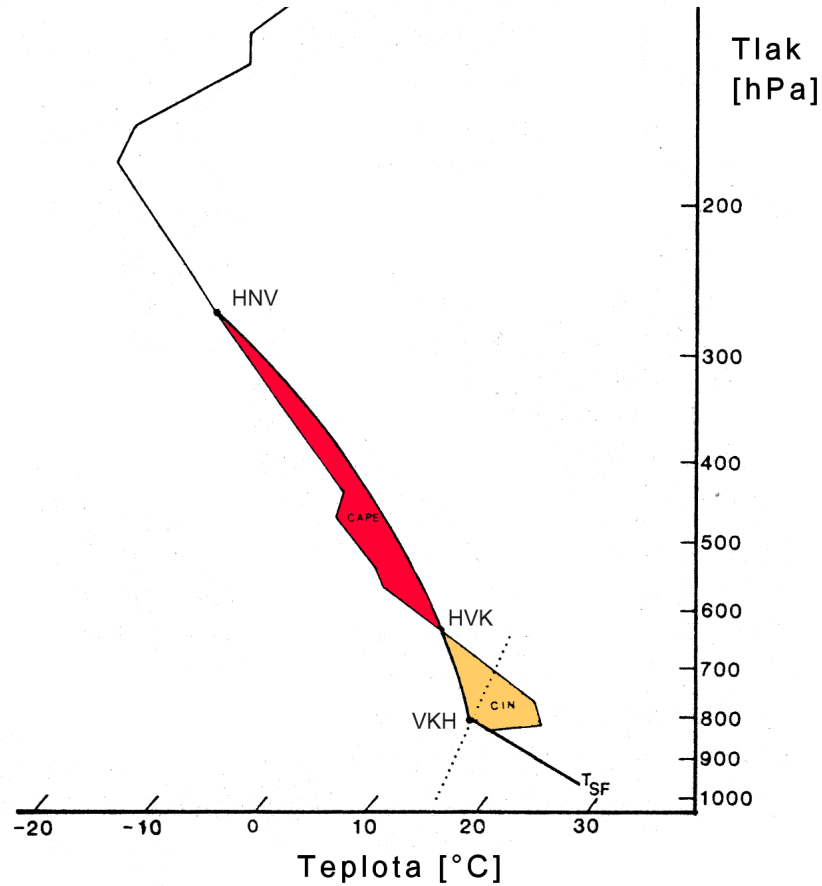
Typické hodnoty CAPE pro dny s mírnou až silnou konvekcí se pohybují od 1000 do 3000 J/kg, maximální pozorované hodnoty byly zjištěny v USA v rozmezí 5000 – 7000 J/kg [2]. Pro evropské prostředí ve dnech s kroupami uvádí [16] průměrnou hodnotu CAPE 660 J/kg. Pro intenzivní projevy konvekce nejsou vysoké hodnoty CAPE zásadní (viz např. [15, 16]). Hodnoty CAPE jsou značně citlivé na vlhkost vzduchu při zemském povrchu (viz [2]).

Existence CAPE je nezbytnou, ale nikoliv postačující podmínkou pro vývoj konvekce. Je to způsob, jak zhodnotit energetický potenciál atmosféry, který může ale nemusí být uvolněn. Jejím uvolnění musí předcházet spouštěcí mechanismus, jako např. zahřátí na teplotu volné konvekce, přechod frontálního rozhraní nebo vertikální pohyb vyvolaný konvergencí přízemního proudění či překonáním orografické překážky. V úvahu se musí brát také vlhkost vzduchu v nižších hladinách, která se uplatňuje jako zdroj latentního tepla uvolňovaného při vertikálních konvekčních pohybech [16].

Pro předpověď silné konvekce je zároveň nutná diskuze hodnoty veličiny CIN (z angl. *Convective INhibition*), jež znázorňuje práci, kterou je třeba vykonat k vyzvednutí adiabaticky izolované vzduchové částice s nulovou počáteční rychlostí od zemského povrchu do HVK [2]. Pro vyjádření CIN jako kladné veličiny můžeme použít výraz

$$\text{CIN} = -g \int_0^{HVK} \frac{T(z) - T_e(z)}{T_e(z)} dz. \quad (3.2)$$

Na termodynamickém diagramu odpovídá CIN ploše mezi křivkou zvrstvení a suchou resp. vlhkou adiabatou spojující zemský povrch s HVK (viz obrázek 3.1). CIN tedy představuje



Obrázek 3.1: Ilustrace CAPE a CIN na termodynamickém diagramu (upraveno dle [2]). T_{SF} je teplota zemského povrchu, úzká plná čára znázorňuje teplotní zvrstvení a tečkovaná čára je izogramou maximálního směšovacího poměru. CAPE je úměrná ploše mezi křivkou zvrstvení a nasycenou adiabátou (silná plná čára), která protíná HVK. Silná plná čára mezi povrchovou teplotou a VKH reprezentuje suchou adiabatu. CIN je úměrný ploše mezi křivkou zvrstvení, vlhkou adiabátou procházející VKH a suchou adiabátou spojující VKH s T_{SF} .

energetickou bariéru ve spodních hladinách, kterou je nutno při vývoji konvekce překonat. Hodnota CIN je vhodným doplňkem hodnoty CAPE, je však velice citlivá na podmínky v mezní vrstvě (viz [16, 20]). Při využití těchto veličin ale musíme mít na paměti, že jde o charakteristiky vztahující se k výstupu adiabaticky izolované vzduchové částice a předpoklad adiabatičnosti může být při konvekci v atmosféře silně narušen [9]. Hodnoty CAPE a CIN lze numericky stanovit přímo z aerologických dat (viz [16]) nebo z prognostických teplotních profilů (viz např. [20]).

Zatímco termodynamická struktura ovlivňuje zrychlení vystupující částice a tedy i vertikální rozsah konvekčního oblaku, vertikální stříh větru má silný vliv na uspořádání konvekční bouře. Už autoři starších indexů i srovnávacích studií si byli vědomi důležitosti vlivu dynamických podmínek, proto se prahové hodnoty některých indexů měnily v závislosti na vlastnostech pole proudění [9]. Mezi indexy, které kromě charakteristik statické stability zahrnují i dynamické veličiny vztahující se k vlastnostem pole proudění (speciálně vertikální

střih větru), patří tzv. „bulk“ Richardsonovo číslo (angl. *Bulk Richardson Number*, BRN), jenž kombinuje vertikální střih větru a vztlak. Můžeme jej vyjádřit vztahem

$$\text{BRN} = \frac{\text{CAPE}}{0,5(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)}, \quad (3.3)$$

kde jmenovatel vyjadřuje kinetickou energii střihu větru mezi spodními a horními hladinami troposféry. Pro výpočet střihu větru se nejčastěji bere v úvahu rozdíl mezi střední hodnotou rychlosti větru ve spodních 6 km a ve spodních 500 m, přičemž obě střední hodnoty jsou váženy hustotou vzduchu [9]. Další charakteristikou je tzv. helicity stanovená relativně k pohybu bouře (angl. *Storm RElative Helicity*, SREH) daná jako

$$\text{SREH} = \int_0^h \mathbf{k} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{c}) \times \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} dz, \quad (3.4)$$

kde h je předpokládaný vertikální rozsah vtoku do bouře (často se počítá s hodnotou 3000 m), \mathbf{c} je vektor rychlosti postupu bouře, $\mathbf{v}(z)$ je vertikální profil vektoru okolního větru a \mathbf{k} je vertikální jednotkový vektor (dále viz část 3.1.2). Hodnota SREH by měla být účinnější při předpovědi rotace výstupného proudu než hodnota BRN [9].

Význam indexů stability rozvojem numerických předpovědních metod klesá, nicméně i nadále zůstávají pomocným prostředkem při určení intenzity konvekce a s tím souvisejících nebezpečných povětrnostních jevů, jejichž prognóza je stěžejním úkolem předpovědní služby ČHMÚ.

3.1.2 Hodograf větru

Hodograf je podle [12] čára spojující koncové body vektorů, které jsou znázorněny v polárních souřadnicích a vycházejí z počátku souřadnicového systému. V meteorologii je hodograf efektivním nástrojem pro analýzu vertikálního profilu větru a v kombinaci s hodnotami CAPE se používá jako jeden z prediktorů konvekce. Hodografy jsou spolu s výpočtem helicity z naměřených aerologických dat vykreslovány pro stanice Praha, Prostějov a Vídeň a archivovány v interní síti ČHMÚ [25]. Je možné mít k dispozici hodograf sestavený z naměřených hodnot, popř. modifikovaný podle konkrétních větrných podmínek v daném území (aerologická sondáž nemusí být pro oblast zájmu reprezentativní) nebo předpovězený modelem ALADIN (od roku 2001) [15].

Změny vektoru větru s výškou zobrazujeme v hodografu tak, že vlastní křivka hodografu je poskládaná z dílků vektorových rozdílů horizontálního větru v sousedních výškových hladinách. Podíl velikosti rozdílového vektoru a vzdálenosti hladin, z nichž je vektorový rozdíl počítán, je střih větru s rozměrem $[\text{s}^{-1}]$ a hodnotou většinou řádu tisícín. V praxi se používá tzv. totální střih větru pro zvolenou vrstvu udávaný jako délka křivky hodografu v jednotkách $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$. V souvislosti s bouřkami se pozornost zaměřuje hlavně na vrstvu 0–6 km, která by měla charakterizovat integrální střih větru mající vliv na strukturu bouřkového oblaku [2], příp. dílčí vrstvy 0–3 km nebo 0–1 km. Při délce hodografu větší než 15–20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ bývají projevy konvekce velmi nebezpečné, často s výskytem hůlavy, krup a intenzivních srážek (velmi důležité jsou však podmínky vzniku konvekce a orientace hodografu vzhledem k linii konvekce) [15].

Z hodografu je tedy možné určit směr vektoru průměrného stříhu větru důležitý pro odhad pohybu bouře. Na vývoj bouřkových systémů má podstatný vliv také tvar hodografu (přímočarý, levostáčivý, pravostáčivý), příp. v jaké vrstvě je zakřivení situováno. Další užitečnou informací je rozložení stříhu větru ve výškovém profilu. Větší efekt na vývoj a strukturu oblaku při stejné délce hodografu totiž bude mít silný nízkohladinový stříh než zesílení větru ve vyšších hladinách. Pomocí ID metody (z angl. *Internal Dynamics*) založené na vnitřní dynamice supercel je možné graficky zkonstruovat vektor pohybu bouře (podrobněji viz např. [15]). Z hodografu lze také určit směr a rychlost proudu, který do bouře vhání vlhký vzduch - zdroj energie bouře. Čím rychlejší je vtékající proudění, tím více energie se uvolní pro výstupný proud [15].

Pokud je hodograf ve svém počátku zakřivený, vymezí jeho křivka a vektory přízemního a výškového relativního proudu (výpočet se provádí do hladiny 3000 m) plochu úměrnou složce vorticity, která po napřímení proudu vtékajícího do bouře může vyvolat jeho horizontální rotaci, tj. vývoj mezocyklony a za příznivých okolností supercely. Takto vymezená složka vorticity je právě helicity stanovená relativně k pohybu bouře SREH (viz část 3.1.1). Potenciál pro rotaci bouře je tím větší, čím rychleji vzduch do bouře proudí a čím výrazněji se vítr v nízkých hladinách atmosféry s výškou stáčí [15]. Jak je uvedeno v [25], velmi přibližně platí, že supercely vznikají při helicitě větší než $150 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, hodnoty nad $300 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ indikují případy s výskytem tornáda. Uvádí se zde také, že hodnoty stříhu větru ve vrstvě od zemského povrchu po výšku hladiny 200 hPa 5.10^{-3} až $20.10^{-3} \text{ s}^{-1}$ jsou příznivé pro tvorbu supercel. V [15] je také uvedeno, že přestože prostředí s přímým hodografem nemusí vést k vývoji supercel, bývají projevy konvekce zejména při délce hodografu větší než $15\text{--}20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ velmi nebezpečné, často s výskytem húlavy, krup a intenzivních srážek. Důležitou roli zde hrají také podmínky vzniku konvekce a orientace vzhledem ke křivce hodografu.

3.2 Využití metod dálkové detekce

Pro identifikaci a velmi krátkodobou předpověď nebezpečných povětrnostních jevů byla po většinu 20. století využívána především data z profesionálních synoptických stanic, které v určených termínech předávaly zakódované zprávy o počasí [17]. V současné době nezastupitelné místo zaujímají metody dálkové detekce. Dálkový průzkum Země je podle [12] pozorování a měření objektů nebo jevů na zemském povrchu a v atmosféře bez přímého fyzického kontaktu s měřícími přístroji. Informace o ovzduší nebo aktivním povrchu se získávají pomocí zařízení, která přijímají určitý druh signálu, jehož nosičem je nejčastěji elektromagnetické záření v různých oborech spektra. Tato zařízení mohou zpracovávané signály aktivně vysílat (meteorologické radary) nebo pasivně přijímat (radiometry meteorologických družic, čidla pro detekci blesku). Většina informací z uvedených prostředků slouží především k identifikaci a lokalizaci oblačnosti a její struktury. Metody dálkové detekce umožňují lepší rozpoznání okamžitého vývoje oblačných systémů a přináší tak přímé využití této informace pro velmi krátkodobou předpověď počasí [17].

Bouřky mohou být pozorovány všemi konvenčními metodami, ale právě metody dálkové detekce mají obzvláštní důležitost při detekci a identifikaci bouřek. Jejich výhodou je zejména vysoká prostorová a časová rozlišovací schopnost. Ukazují téměř aktuální vývoj konvekčních systémů a poskytují velmi podrobný plošný přehled důležitého vývoje meteorologických ob-

jektů. Jejich údaje pomáhají výrazně zlepšit práci výstražných systémů. Nevýhodou metod dálkové detekce je někdy nelehká interpretace příslušných údajů (viz [9, 34]). Klíčovou úlohu pro správné využití informací poskytovaných těmito metodami totiž hraje správné pochopení možností i omezení těchto systémů. Vzhledem k výrazně nelineárnímu chování bouřkových buněk je možné odhadovat budoucí vývoj pouze s jistým časovým zpožděním, přičemž důležitou roli hraje také meteorolog ve službě.

RNDr. Petr Novák, PhD. z Radarového oddělení ČHMÚ vytvořil aplikaci JSMeteoView, která sdružuje informace z radarové sítě České republiky CZRAD, z geostacionární meteorologické družice MSG a ze systému detekce blesku. Vytvořený obrázek lze ještě doplnit o vrstvy izolinie geopotenciálu tlakových hladin 500 a 700 hPa nebo předpovědi srážek (za 6 hodin, čas udává konec intervalu) vypočtené modelem ALADIN. Lze zde zobrazit také pohybové pole určené ze dvou po sobě jdoucích radarových snímků maximální odrazivosti či extrapolační předpověď pole maximální radarové odrazivosti určené metodou COTREC, která se operativně využívá především kvalitativně pro předpověď srážek a nebezpečných jevů spojených s konvektivními bouřkami. Je zde umožněno také sledování konvektivních jader metodou CELLTRACK. Zobrazovaná data mají rozlišení 1×1 km horiz. a 0.5 km vertikálně (radar). K lepší orientaci je možné si zobrazit orografii, okresy, povodí nebo říční síť. Webová aplikace JSMeteoView se mj. používá v provozu pro tzv. *nowcasting* (viz [9, 34]).

3.2.1 Meteorologické radary

Meteorologické radary (z angl. *Radio Detection And Ranging*) slouží k pozorování atmosféry založeném na šíření elektromagnetických vln [12]. Generují krátké vysokoenergetické pulsy v části elektromagnetického spektra s vlnovou délkou řádu jednotek centimetrů a přijímají část vyslaného záření, jež se zpětně rozptýlí od oblačných a srážkových částic. Evropské operativní radary používají nejčastěji C-pásmo, tedy vlnovou délku $\lambda = 5$ cm. Operativní provoz meteorologických radiolokátorů v České republice (radar Skalky a radar Brdy-Praha, oba provozované ČHMÚ, $\lambda = 5,3$ cm) byl založen na opakovaném měření v posloupnosti šestnácti elevačních úhlů, které byly vybrány tak, aby zajistily co nejkvalitnější třírozměrné pokrytí sledované oblasti. Měřily každých 10 minut (každých 5 minut spodní čtyři elevace a část z dalších elevačních úhlů) do vzdálenosti cca 260 km (více viz [9, 30]). Od června 2009 se změnila skenovací strategie a operativně se měří vybraných dvanáct elevačních úhlů každých 5 minut, přičemž speciální nízkohladinový sken pro dopplerovské využití zůstal zachován.

Veličina, která charakterizuje odrazové vlastnosti jednotkového objemu meteorologického cíle a závisí zejména na spektrálním rozdělení velikostí částic, na jejich počtu a tvaru či na fyzikálním stavu hydrometeorů, se nazývá radiolokační odrazivost Z [12]. Defnuje se jako

$$Z = \sum_{i \in IV} D_i^6 = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD, \quad (3.5)$$

kde $D_i \ll \lambda$ značí průměr předpokládaných sférických částic meteorologických objemových cílů a $N(D)$ je spektrum velikosti těchto částic. Základní jednotkou radiolokační odrazivosti Z je $[\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}]$, častěji se však používá logaritmické vyjádření $10 \log Z$ v jednotkách [dBZ] [9]. Jedním ze základních uživatelských produktů radiolokační odrazivosti (sestavené sloučením informací z obou radarů sítě CZRAD) je pole maximální odrazivosti ve vertikálním sloupci určené pro každý element (pixel) horizontálního pole ze všech naměřených hladin PPI (z angl.

Plan Position Indicator), označovaný jako MAX Z. V této práci budeme používat produkt MAX Z 3D, kde jsou navíc oproti výše zmiňovanému produktu vypočteny boční průměty maximálních odrazivostí ve směru jih-sever a západ-východ.

Meteorologické radary poskytují okamžitý přehled o pohybu, struktuře a vývoji oblačných systémů, slouží také k včasné identifikaci krupobití a varování před dalšími nebezpečnými jevy [17]. Na základě údajů z meteorologických radarů můžeme odhadnout intenzitu srážek nad danou oblastí s prostorovým rozlišením až 1×1 km. Data z meteorologických radarů díky pokrytí poměrně velkého území a dobrému prostorovému i časovému rozlišení vhodně doplňují síť pozemních a srážkoměrných stanic i družicová pozorování [17]. Radarová měření se využívají hlavně při předpovědi srážkové oblačnosti, srážek a nebezpečných jevů spojených s konvekční oblačností na dobu několika hodin, pro nowcasting. Délka předpovědního intervalu extrapolačních metod používaných pro nowcasting srážkové oblačnosti je však omezena nelinearitou jejich vývoje. Jak uvádí [9], při jedné izolované bouřce je tato hranice zhruba 10 až 30 minut, u silných bouří 10 až 60 minut, u většího komplexu bouřek jedna i více hodin a u frontálních systémů několik hodin.

Dopplerovské radiolokátory měří kromě radiolokační odrazivosti Z také změnu frekvence navraceného signálu prostřednictvím měření jeho fáze. Z této změny frekvence lze podle teorie Dopplerova efektu určit radiální složku rychlosti meteorologických cílů [9]. Jsou proto např. používány k odhadu průměrného vektoru větru v různých výškách. Pomocí dopplerovského radiolokátoru se měří též spektrální rozložení velikostí kapalných a tuhých částic v atmosféře, růst velikosti srážkových elementů, turbulence či stříh větru [12]. Umožňují rovněž studovat strukturu nebezpečných meteorologických jevů jako jsou downbursty, mezo-cyklony či tornáda.

3.2.2 Meteorologické družice

Družicová meteorologie se zabývá získáváním a zpracováním meteorologických údajů dálkově snímaných z vesmírného prostoru. Zajišťuje především informace o rozložení a struktuře oblačnosti, atmosférického proudění, o stavu zemského povrchu a vodních hladin, znečištění ovzduší a informace o rozložení a intenzitě záření zemského povrchu, oblačnosti, mlh apod. Měření tohoto záření pak umožňuje výpočet velkoprostorového rozložení teploty povrchu Země a oblačnosti, vertikálních profilů teploty atmosféry a vlhkosti vzduchu nebo stanovení různých parametrů horní hranice oblačnosti [12]. Hlavním přínosem meteorologických družic je zpřesňování analýzy aktuálního počasí a jeho předpovědí a to jak formou jednotlivých snímků a jejich animací, tak formou vstupu do numerických modelů počasí. Meteorologické družice monitorují zemskou atmosféru od roku 1960, kdy byla vypuštěna první experimentální meteorologická družice TIROS-1 (USA) s nízkou polární dráhou [9]. Mají tedy značný význam i pro dlouhodobé sledování zemské atmosféry - klimatologii, hydrologii a oceánologii i řadu dalších oborů jako ekologii či monitorování živelných katastrof.

Současné operativní meteorologické družice pracují v režimu pasivního snímání záření pocházejícího ze zemského povrchu, horních vrstev oblačnosti popř. plynných složek atmosféry. Aktivní přístroje (lidary, radary) mají v dnešní době z hlediska využití na meteorologických družicích zatím spíše experimentální či vývojový charakter. Záření, které je družicí snímáno, je buď odražené či rozptýlené sluneční záření ve viditelném nebo blízkém infračerveném oboru, nebo dlouhovlnné vyzařování [9].

Družicová pozorování slouží pro posouzení intenzity a vývojového stadia konvekčních bouří, jejich vnitřní struktury a především vazby na radarová pozorování. Protože oblačnost bouří dokonale maskuje jevy v nižších hladinách či u zemského povrchu, není možné na družicových snímcích pozorovat doprovodné jevy vyskytující se pod bouří. Výjimkou jsou pouze případy, kdy projevy přízemních jevů zasáhnou mimo prostor oblačnosti samotné bouře (např. downburst). Interpretace vzhledu horní hranice oblačnosti (HHO) konvekčních bouří představuje významnou disciplínu družicové meteorologie. Podrobnější informace o vzhledu teplotního pole HHO, multispektrálních vlastnostech HHO a jejich vazbě na mikrofyzikální složení HHO konvekčních bouří lze nalézt v [9] či v [11].

V meteorologické praxi jsou u nás v současné době využívány především informace z geostacionární družice MSG (z angl. *Meteosat Second Generation*) provozované organizací EUMETSAT (*European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*) s radiometrem SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*), která poskytuje každých 15 minut údaje ve dvanácti spektrálních kanálech s prostorovým rozlišením několika kilometrů (pro oblast střední Evropy přibližně 4×6 km, kanál HRV (z angl. *High Resolution Visible*) pak okolo 2×3 km). Z družic na polárních drahách jmenujme americké družice NOAA/POES (*National Oceanic and Atmospheric Administration/Polar-orbiting Operational Environmental Satellite*) a evropské družice METOP (*Meteorological operational polar satellite*), které nesou šestikanálovou verzi radiometru AVHRR (z angl. *Advanced Very High Resolution Radiometer*) s rozlišovací schopností přibližně $1,1 \times 1,1$ km v nadiru družice a asi $2,5 \times 4,5$ km na okraji snímané oblasti. Nicméně data zobrazující konkrétní oblast jsou z jedné polární družice k dispozici zpravidla pouze dvakrát denně, s výjimkou polárních oblastí (podrobněji viz [9, 22]).

V naší práci jsme využívali operativní produkty z MSG. Podrobnější informace o jednotlivých spektrálních kanálech lze nalézt např. v [9], o produktech z MSG pojednává [4]. **IR-BT** je klasický spektrální kanál IR10.8 v černobílém inverzním zobrazení, kde je navíc barevně zobrazen interval velmi nízkých teplot 200 K (červená) až 240 K (modrá). Užitečným bývá zejména právě při sledování bouřkové oblačnosti. Denní produkt **VIS-IR** se barevně blíží vnímání lidským okem, kombinuje kanály VIS0.6, VIS0.8 a IR10.8. Nízká až střední oblačnost je zde zobrazena žlutě, vysoká oblačnost bíle až modře a terén pokrytý vegetací tmavě zeleně, poušť světle zeleně až žlutě, voda je tmavě modrá. Produkt **Storm** byl vytvořen s cílem zvýraznit bouřkovou oblačnost a pokud možno také určit intenzitu bouře. Sytější žlutá barva značí přítomnost většího množství drobných částic ledu ve vrcholových partiích Cb, která může (ale nemusí) indikovat intenzivnější výstupné proudy v konvekčním oblaku, tedy potenciální nebezpečnost bouře.

3.2.3 Systémy detekce a lokalizace blesků

Další metodou distančních měření jsou systémy detekce a lokalizace blesků, které rozšiřují získané informace o aktuálním vývoji počasí o přesnou lokalizaci bleskové aktivity. Blesky slouží jako indikátor konvekční činnosti při velmi krátkodobé předpovědi srážek či nebezpečných konvekčních jevů, systémy detekce blesků tak umožňují lépe identifikovat rozvíjející se bouřkovou oblačnost.

Při výboji blesku dochází ke vzniku tzv. atmosfériků, tj. poruch elektromagnetického pole ve tvaru krátkých impulsů, které jsou vyvolány pohybem elektrického náboje v kanálu

blesku a jež se šíří v nižších vrstvách atmosféry [12]. Pozemní detekce blesků je založena na čidlech přijímajících a vyhodnocujících část spektra elektromagnetické energie generované bleskem. Aby byla zajištěna dostatečně přesná lokalizace bleskových výbojů, rozmísťuje se na sledovaném území větší množství těchto detekčních čidel vzdálených od sebe desítky až stovky kilometrů. Pokud je výboj blesku zaznamenán dostatečným množstvím čidel, na centrálním serveru se vyhodnotí jeho poloha buď na základě času zaznamenání signálu anténou čidla, nebo ze směru zdroje signálu. Pro zkvalitnění výpočtu polohy výboje blesku se používají obě zmíněné metody, dosahuje se tak přesnosti lokalizace až 500 m [9].

Během let 2001 a 2002 bylo v České republice instalováno několik čidel schopných v reálném čase identifikovat bleskové výboje. Spolu s čidly na území Polska, Slovenské republiky a Maďarska a fungujícím Rakouským a Německým detekčním systémem se tak podařilo v dostatečné míře pokrýt celý region střední Evropy a vznikla Středoevropská síť pro detekci a lokalizaci bleskových výbojů (*Central European Lightning Detection Network*, CELDN) jako součást celoevropského sdružení EUCLID (*EUropean Cooperation for LIghtning Detection*) [31].

Informace z těchto detekčních senzorů jsou v reálném čase zasílány k vyhodnocení do centrálního zpracovatelského počítače v německém Karlsruhe, který na základě dat z jednotlivých čidel zjistí, zda šlo skutečně o blesk. Pokud ano, určí jeho polohu, čas, typ blesku (oblak-oblak (značeno CC) nebo oblak-země (CG)), odhad proudové amplitudy, příp. polaritu bleskového výboje [31]. Takto zpracovaná data se pak distribuují a ukládají do databáze, ze které jsou v pevných časových intervalech (v ČHMÚ každou desátou minutu) generovány obrázky znázorňující výboje blesků za určité časové období. Časový vývoj bouřkové aktivity je pak možno sledovat jako animaci těchto obrázků, nebo lze jednotlivé výboje postupně vykreslovat a kódovat jejich stáří pomocí barevné škály. Údaje ze systému detekce blesků se často zobrazují v kombinaci s měřeními z meteorologických radarů (popř. družic). Při vyhodnocování bouřkové činnosti za delší časové období se mohou jednotlivé výboje v oblastech silné bleskové aktivity překreslovat přes sebe, proto je vhodnější zobrazovat hustotu výbojů jako počet detekovaných blesků na jednotkové ploše [9].

Blesky mohou být pozorovány také z oběžné dráhy Země, a to jak družicemi, tak posádkami pilotovaných kosmických letů či při leteckém pozorování ze stratosférických letadel. Výboje jsou registrovány nejen v optické části spektra a v oblasti rádiových vln, ale např. i v oblasti záření gama. Pozorování z raketoplánů z konce 80. a počátku 90. let 20. století zároveň odhalila a zdokumentovala novou kategorii výbojů generovaných konvekčními bouřkami a zasahujícími desítky kilometrů do stratosféry, označovanou jako TLE (angl. *Transient Luminous Events*). Mezi TLE patří *sprites*, *blue jets* a *ELVES* (z angl. *Emissions of Light and Very low frequency perturbations from Electromagnetic pulse Sources*), více viz např. [36]. Systémy detekce blesků umístěné na oběžných drahách sice mají výhodu v globálnosti svých měření, pozemním systémům však nemohou konkurovat v přesnosti lokalizace bleskových výbojů [9].

3.3 Výstupy numerických modelů

V literatuře se zpravidla uvádí, že první synoptickou mapu publikoval roku 1820 německý meteorolog H. W. Brandes, kterou vytvořil na základě starších archivních meteorologických údajů. Teprve rozvoj telegrafu v polovině 19. století umožnil rychlou výměnu zpráv o počasí

mezi jednotlivými meteorologickými stanicemi, začaly se tak poprvé sestavovat povětrnostní mapy na základě aktuálních informací. Myšlenku, že počasí lze předpovídat s použitím fyzikálních metod na základě řešení soustav hydrodynamických a termodynamických rovnic, vyslovil roku 1858 pravděpodobně jako první H. Helmholtz. Teoreticky přesněji ji formuloval V. Bjerknes počátkem 20. století. Důležitým mezníkem v historii předpovědi počasí se stal pokus Angličana L. F. Richardsona vypočítat budoucí stav atmosféry ze znalosti stavu současného, který byl publikován až roku 1922 [12]. I přes jeho neúspěch byly položeny základy numerické předpovědi počasí (*Numerical Weather Prediction*, NWP).

Metody klasické synoptické předpovědi vycházejí z empirické metody založené na principech tzv. norské (bergenské) školy. Ve své době byly úspěšné - dávaly použitelné předpovědi počasí na dobu 24 – 48 hodin. Kvalita předpovědi však mj. závisela na zkušenostech meteorologa, na jeho vzdělání a dostatečné znalosti výchozích meteorologických pozorování [5]. Bylo tedy třeba vyloučit subjektivitu z metod předpovědi počasí, což se zčásti povedlo až po zavedení tzv. numerických (objektivních) předpovědních metod. V současné době tvoří NWP základ jakýchkoliv krátkodobých a střednědobých předpovědí počasí. Atmosférické procesy totiž mají i svou chaotickou složku a jejich obecná prediktabilita (předpověditelnost) matematicko-fyzikálními metodami má objektivně dané omezení, proto předpovědi na delší časové období (více než 10 dní) vycházejí spíše ze statistických (tj. pravděpodobnostních) metod [5].

NWP je výsledkem časové integrace prognostických diferenciálních rovnic některého fyzikálního modelu atmosféry prováděné na počítačích metodami numerické matematiky [12]. Je tedy založena na výpočtech systému tzv. základních rovnic dynamiky atmosféry [5, 6] popisujících s dostatečným přiblížením fyzikální procesy probíhající v zemské atmosféře. Další vývoj a zlepšování předpovědi probíhá zejména v oblasti zdokonalování matematických modelů NWP a rychlejší dostupnosti kvalitnějších vstupních dat, která model pro výpočet předpovědi potřebuje [9]. Pokrok v NWP souvisí také se stále dokonalejší parametrizací dějů v atmosféře, se zpřesňováním metod numerické integrace či zahrnutím meteorologických informací z metod dálkové detekce prostřednictvím postupů tzv. asimilace dat. V současné době probíhá vývoj numerických předpovědních modelů, které se zejména s přechodem na nehydrostatické verze a zvyšováním rozlišení dostávají na prostorový krok, jenž umožňuje explicitní popis větších uspořádaných konvekčních systémů. Tyto nehydrostatické modely jsou postupně zaváděny do rutinního provozu meteorologických služeb. Avšak problematické je, a zřejmě dlouho bude, modelování neuspořádané konvekce [16].

V současných meteorologických předpovědních službách se používají tzv. teleskopizované systémy numerických modelů. Jak uvádí [5], jejich prvním článkem je velkoprostorový (polokoulový nebo celozemský) model s velkým horizontálním prostorovým krokem numerické integrace o délce v rozsahu 100 až 300 km. Výsledky tohoto modelu se pak jako okrajové podmínky používají pro detailnější modely, které zahrnují relativně menší oblasti s podstatně jemnější prostorovou sítí numerické integrace. Druhý stupeň obvykle tvoří modely kontinentálního rozsahu, zatímco třetí stupeň pak reprezentují regionální modely s rozsahem přibližně odpovídajícím území evropských států, tedy s prostorovým krokem integrace o velikosti řádu jednotek km [5]. Různé prostorové měřítko modelů (rozlišovací schopnost) potom velmi úzce souvisí i se způsobem modelového zahrnutí různých fyzikálních dějů neboli s použitím parametrizace.

Parametrizace se používá v prognostických modelech atmosféry při charakterizování pro-

cesů souvisejících např. s konvekcí, turbulencí, s působením složitých orografických poměrů nebo s výměnou tepla mezi zemským povrchem a atmosférou. Konkrétně konvekce se při rozlišení modelu vyšším než asi 10 km stává částečně rozeznatelnou, částečně však zůstává nerozlišitelná. Při parametrizaci konvekce je důležité uvažovat následující aspekty. Jednak vliv velkoprostorových polí na vývoj konvekce, který směřuje k určení konvekčních srážek, jednak zpětné působení konvekce na okolí - vertikální rozdělení latentního tepla uvolněného v oblacích a vertikální transport tepla, vlhkosti a hybnosti [8]. Je nutno vytvořit takové schéma, jež průběžně interaguje s explicitním vlhkostním cyklem modelu, tzv. hybridním schématem. To se skládá ze tří složek: tzv. *triggering* funkce aktivující konvekci, model konvekčního oblaku odhadující jeho vlastnosti jako funkce modelových proměnných a uzávěr, který je obvykle formulovaný tak, aby určil celkové množství konvekce. V budoucnu se pravděpodobně NWP obejde bez parametrizace hluboké konvekce, kterou nahradí parametrizace mikrofyziky, ale parametrizace mělké (nesrážkové) konvekce bude stále potřebná (více viz např. [8]).

Přestože se numerické modely stále zkvalitňují a zvyšuje se jejich rozlišení, nejsou ještě podle [9] vhodné pro operativní provoz v aplikacích nowcastingu konvekčních srážek. Modely NWP již dlouhou dobu zahrnují vývoj srážek z vrstevnaté oblačnosti pomocí parametrizované mikrofyziky narozdíl od předpovědi konvekčních srážek, kde se stále v řadě modelů využívají různé typy parametrizace konvekce. S rostoucí horizontální rozlišovací schopností o řádové velikosti jednotek km se však více užívá přímý výpočet konvekčních srážek podobně jako u srážek z vrstevnaté oblačnosti. Současně se přechází od modelů, které užívaly hydrostatickou aproximaci, k modelům nehydrostatickým. Probíhají také nejrůznější experimenty a vývoj metod asimilace dat z distančních měření do numerických modelů, které by dostatečně podrobně popsaly počáteční rozložení srážkových útvarů, pole vlhkosti a přízemní konvergence. Můžeme proto očekávat prodloužení doby varování před silnými lokálními srážkami oproti metodě nowcastingu založené na extrapolaci měřených dat nebo na jejich statistickém hodnocení [9].

Sebedokonalejší předpovědní model představuje pouze určité zjednodušení reálné atmosféry a jejích vazeb k hydrosféře, litosféře, kryosféře, resp. biosféře, proto i dnes při hodnocení a prognostické interpretaci výstupů numerických modelů přísluší nezanedbatelná role pracovníkům meteorologických předpovědních služeb. Výsledky těchto modelů bude zřejmě vždy nutné posuzovat a interpretovat s jistou mírou kritičnosti, a to především v situacích se zvláště složitými, méně obvyklými a nestabilními podmínkami v atmosféře, jež většinou souvisejí s výskytem extrémnějších forem počasí. Při interpretaci vlastních výsledků numerických předpovědních modelů na konkrétní předpověď některých jevů počasí meteorologům pomáhají různé navazující počítačové programy a softwarová vybavení v podobě statistických aplikací, automatických expertních systémů apod [5]. Protože žádný současný předpovědní model není dokonale univerzální pro celou Zemi a v celém spektru meteorologických situací, jednotlivá meteorologická předpovědní centra dnes zpravidla využívají výstupů několika výpočetních modelů. V naší práci jsme používali lokální model ALADIN a globální modely ECMWF a GFS.

3.3.1 Numerický předpovědní model ALADIN

Roku 1990 se ČHMÚ stal zakládajícím členem projektu ALADIN (z franc. *Aire Limitée, Adaptation Dynamique, development INternational*), řízeném francouzskou povětrnostní službou

Météo-France. Cílem tohoto projektu bylo společně vyvinout regionální verzi globálního modelu ARPEGE (z franc. *Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle*), jenž byl součástí společného projektu Météo-France a Evropského centra pro střednědobou předpověď počasí (*European Center for Medium range Weather Forecasting*, ECMWF). Numerický předpovědní model ALADIN byl tedy původně koncipován jako dynamická adaptace výsledků předpovědi modelu ARPEGE na vyšší rozlišení, záměrem bylo zpřesnění výsledků globálního modelu v cílové oblasti [29]. Roku 2004 se zvýšilo rozlišení ALADIN/CE (z angl. *Central Europe*) na 9 km a 43 hladin. Od července roku 2005 probíhá výpočet předpovědí počasí čtyřikrát denně. Délka předpovědi je 54 hodin, přičemž průběžné výsledky jsou k dispozici každou hodinu předpovědi. Atmosférické procesy, které nejsou popisovány základním dynamickým jádrem modelu, jsou simulovány v soustavě fyzikálních parametrizací (např. parametrizace hluboké konvekce, parametrizace velkoprostorových srážek, diagnostické schéma oblačnosti) [29].

Prognostický model ALADIN představuje základní prostředek ČHMÚ pro krátkodobou předpověď počasí i jako vstup do hydrologických modelů. Hrubé výsledky předpovědi počasí modelu ALADIN se po výpočtu zpracovávají do finálních produktů: kreslí se mapy, vytvářejí se speciální datové soubory pro další aplikace, počítají se různé diagnostické veličiny aj. Z těchto produktů se pro předpověď jevů souvisejících s konvekcí využívají prognostická pole hodnoty CAPE, CIN, konvergence vlhkosti, Q - vektor, KO index, helicity, předpokládané úhrny srážek apod. Předpovědní tempy modelu ALADIN slouží k analýze vertikálních profilů meteorologických prvků a ke stanovení míry labilita [34].

3.3.2 Numerický předpovědní model ECMWF

V roce 1975 založilo sedmnáct západoevropských států společně Evropské centrum pro střednědobou předpověď počasí ECMWF, které se stalo světovou jedničkou v oboru globálního modelování atmosféry. První předpovědi začalo operativně produkovat roku 1979. V současné době patří jeho střednědobé meteorologické předpovědi (tj. předpovědi na tři až deset dní) mezi nejkvalitnější předpovědi vůbec. Roku 2001 se k němu připojila i Česká republika. Hlavním cílem ECMWF je udržet současný trend zlepšování globálních střednědobých předpovědí s důrazem na včasné varování před extrémními projevy počasí. Neméně důležité jsou také další cíle, mezi které patří zlepšení kvality sezónních předpovědí, poskytování okrajových podmínek pro regionální meteorologické modely, monitorování klimatického systému Země prostřednictvím pravidelných reanalýz nebo optimalizace globální pozorovací sítě. ECMWF sídlící v Readingu organizuje vědecký a technický výzkum zaměřený na zlepšení předpovědí, vyvíjí numerické metody pro střednědobou, měsíční a sezónní předpověď, provozuje globální meteorologický model, poskytuje širokou škálu předpovědních produktů pro meteorologické služby členských států a sbírá a archivuje meteorologická data operativní předpovědi od 1979, ansámblové od 1992.

Hlavním produktem ECMWF jsou deterministické globální předpovědi, které se počítají v 00 a 12 UTC na 10 dní dopředu, s horizontálním rozlišením cca 25 km, 91 vertikálními hladinami do 0,01 hPa - asi 80 km výšky a s časovým krokem 12 minut. Kromě toho počítá i předpovědi na 11. až 15. den. Dalším velmi užitečným produktem ECMWF je systém ansámblové předpovědi (*Ensemble Prediction System*, EPS), kde je zpracováno 50 předpovědí (členů ansámblu) do 10. dne s horizontálním rozlišením cca 50 km a do 11. až 15. dne s rozlišením cca 80 km. Výsledky EPS jsou zobrazovány např. jako vlečky nebo me-

teogramy. Měsíční předpovědi (32 dní dopředu) jsou počítány jednou týdně ve čtvrtek v 00 UTC, výsledky jsou dostupné v 22 UTC.

3.3.3 Numerický předpovědní model GFS

Globální numerický předpovědní model GFS (angl. *Global Forecast System*) je provozován americkým Národním centrem pro environmentální předpověď (*National Centers for Environmental Prediction*, NCEP), jednou ze složek Národní meteorologické služby (*National Weather Service*, NWS) spadající pod Národní úřad pro oceán a atmosféru (angl. *National Oceanic and Atmospheric Organization*, NOAA). Model GFS je spouštěn čtyřikrát denně s délkou předpovědi až na 384 hodin (16 dní) dopředu. Výpočet probíhá ve dvou fázích. V první fázi je povrch Země rozdělen na síť uzlových bodů vzdálených od sebe 35 km, kdy model poskytuje průběžné výsledky každou třetí hodinu předpovědi s celkovým předpovědním intervalem 180 hodin. Ve druhé fázi model počítá s prostorovým rozlišením 70 km, s předpovědním intervalem od 180 po 384 hodin. Výsledky jsou v tomto případě k dispozici každou dvanáctou hodinu předpovědi. Model GFS je jediným globálním numerickým modelem, jehož výsledky jsou poskytovány na internetu zdarma, stává se tak základem pro předpovědi mnoha nestátních organizací zabývajících se předpovídáním počasí.

Kapitola 4

Výstrahy na nebezpečné jevy související s konvekcí

4.1 Systém integrované výstražné služby

Systém integrované výstražné služby (dále jen SIVS) je výstražná služba provozovaná na území ČR v oblasti operativní meteorologie a hydrologie od roku 2000. Společně ji vykonává Centrální předpovědní pracoviště Českého hydrometeorologického ústavu (CPP ČHMÚ) a Odbor hydrometeorologického zabezpečení vojenského geografického a hydrometeorologického úřadu (HMZ VGHMÚř). Předmětem SIVS je jak vyhodnocení meteorologických a hydrologických aktuálních dat a prognózních materiálů, tak vydávání a rozšiřování integrovaných výstražných informací na nebezpečné meteorologické a povodňové jevy. Tyto informace mají za cíl informovat širokou škálu uživatelů (zejména Hasičský záchranný sbor) před nebezpečnými jevy a tím přispět ke snižování následků jejich působení.

V rámci SIVS může být vydána výstražná informace na celkem 26 nebezpečných jevů rozdělených do 7 skupin (viz např. [10, 33]). Každý z těchto jevů může mít rozdílnou úroveň nebezpečí. V úvahu se bere míra intenzity jevu, úroveň pozornosti, kterou je třeba danému jevu věnovat, a také možnost zranitelnosti a rozsah postiženého území [10]:

Nízký stupeň nebezpečí představuje potenciální nebezpečí, ale neočekává se neobvyklý nebezpečný jev. Doporučuje se věnovat pozornost hydrometeorologickým podmínkám při provádění aktivit vystavených jejich působení.

Vysoký stupeň nebezpečí je předpovídán nebo pozorován nebezpečný hydrologický a/nebo meteorologický jev. Je nezbytná bdělost a potřeba sledování hydrometeorologické situace. Lze očekávat materiální škody na větším území nebo velké následky při lokálním postižení a omezení prováděných aktivit.

Extrémní stupeň nebezpečí je předpovídán nebo pozorován nebezpečný a výjimečně intenzivní hydrologický a/nebo meteorologický jev. Je nezbytná nejvyšší ostražitost a potřeba častého sledování informací o hydrometeorologické situaci. Lze očekávat značné materiální škody na velkém území nebo katastrofické následky při lokálním postižení, ohrožení životů a výrazné omezení prováděných aktivit.

Existují dva druhy výstražných informací: **Předpovědní výstražná informace (PVI)** se vydává, jestliže je předpovídán kterýkoliv z nebezpečných jevů, nebo jestliže se tento jev již vyskytuje a je předpoklad jeho dalšího trvání. **Informace o výskytu extrémních jevů (IVEJ)** se vydává, jestliže se právě vyskytl (byl naměřen či pozorován) nebezpečný jev s nejvyšším (extrémním) stupněm nebezpečí. Jedná se o jevy, které mají obvykle rychlý vývoj: silné trvalé sněžení, sněhová bouře, silné bouřky s velmi nebezpečnými doprovodnými jevy, extrémní srážky a povodně. Tato informace má za cíl oznámit výskyt zvláště nebezpečného jevu, eventuálně popsat jeho vývoj na nejbližší cca 3 hodiny.

Za určitých podmínek lze v jedné výstražné informaci SIVS kombinovat i několik nebezpečných jevů z jedné nebo i více skupin. Výstražná informace, která byla vydána a je v platnosti, může být po vyhodnocení dalších hydrometeorologických aktuálních dat dále upřesňována nebo zrušena. V kterémkoliv čase může být v platnosti nejvýše jedna PVI, IVEJ může být v platnosti více.

4.2 Výstrahy na bouřky s doprovodnými jevy

Předpověď bouřek dosahujících nebezpečného stupně vývoje je součástí metodiky SIVS. Nejdůležitějším úkolem je předpovědět územní a časové rozdělení pravděpodobnosti očekávané silné konvekce, především určení oblastí s větší pravděpodobností bouřek, a odhad pravděpodobného typu konvekce - struktura, měřítko a nebezpečnost doprovodných jevů [34]. Intenzita bouřek se pohybuje ve velmi širokém rozmezí, počínaje jen několika výboji (často v zimě) a krátce trvajících srážkami, až po bouřkovou činnost značné intenzity s ničivými doprovodnými jevy. Jako nebezpečné konvekční bouře velmi silné intenzity (angl. *severe convective storms*) jsou na území USA označovány bouře splňující alespoň jedno z následujících kritérií: výskyt tornáda, výskyt krup o průměru větším než 2 cm nebo výskyt ničivého větru o rychlosti přesahující 25 m.s^{-1} [3]. V Evropě však podobná hranice mezi slabými a silnými bouřemi nebyla stanovena. Obvyklá intenzita srážek v bouřkách na území ČR je 10 až 40 mm.h^{-1} , výjimečně však mohou srážkové úhrny dosáhnout více než 100 mm.h^{-1} [33] (viz kapitola 2.3). Vzhledem k tomu, že konvekční bouře patří mezi jevy lokální (její projevy postihují pásmo podél trajektorie postupu bouře), je pravděpodobnost výskytu extrémních projevů bouře (zejména přívalového deště a krupobití) v daném místě malá. Tyto projevy však mohou být velmi intenzivní.

Předpovědní výstražné informace představující vysoký stupeň nebezpečí jsou vydávány na bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy - kód V.1 v případě, kdy se očekává výskyt srážek s úhrnem nad 25 mm.h^{-1} nebo nad 35 mm za 6 hodin či krupobití nebo pokud rychlost maximálního nárazu větru přesahuje 22 m.s^{-1} . Výstražné informace představující extrémní stupeň nebezpečí se vydávají na silné bouřky s velmi nebezpečnými doprovodnými jevy - kód V.2. V tomto případě se jedná o zvláště velkou intenzitu bouřkové činnosti doprovázenou krupobitím s výskytem srážek nad 70 mm za 3 hodiny nebo nad 80 mm za 6 hodin nebo silným nárazovým větrem o rychlosti vyšší než 29 m.s^{-1} [33]. Výstražné informace nejsou vydávány zvláště na jednotlivé doprovodné jevy bouřek. Silný vítr a dešťové srážky, které nejsou v přímé souvislosti s bouřkovou činností, se uvádějí ve výstražné informaci s kódem II. Vítr a VI. Dešťové srážky. V případech, kdy intenzivní bouřková činnost způsobí vzestupy hladin větších vodních toků, mohou být součástí výstrahy a/nebo mohou následovat výstražné

informace s kódem VII. Povodňové jevy.

Výstražné informace na bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy jsou vydávány zpravidla 36 až 6 hodin předem. Vzhledem k dynamice a nelinearitě vývoje bouřek jsou informace s tímto předstihem pouze rámcové. Upozorňují, ve které části území ČR nebo ve kterých krajích lze očekávat výskyt bouřek s nebezpečnými doprovodnými jevy. Bližší lokalizaci místa, kde se silné bouřky s ničivými projevy vyskytnou, lze upřesnit zpravidla až na základě údajů metod dálkové detekce, tj. v době, kdy již bouřky vznikají, tedy s předstihem řádově jen několika minut nebo desítek minut (metodou CELLTRACK je možné odhadnout jejich postup i na tři hodiny dopředu). Upřesňování výstrahy se obvykle v praxi provádí vydáním nové PVI, příp. IVEJ.

4.3 Meteoalarm

Společná iniciativa více než 20 evropských národních meteorologických služeb dala vzniknout internetovým stránkám www.meteoalarm.eu, kde lze nalézt aktualizované oficiální výstrahy na nebezpečné a extrémní projevy počasí na nejbližších 48 hodin pro většinu států Evropy. Tato stránka nabízí všeobecně srozumitelný přehled (využívající symboly a barevně kódované mapy) i mnoho detailů o stavu nebezpečí plynoucího z počasí v Evropě. Kliknutím na mapku státu je možné přenést se na výstražné informace v národním a regionálním měřítku. Problémem je v současné době nejednotnost metodiky určování intenzity nebezpečných jevů, což vyplývá z rozdílného pojetí nebezpečnosti vzhledem k jednotlivým regionům. Meteoalarm.eu byl vyvinut pro organizaci EUMETNET sdružující evropské národní meteorologické služby. Tento projekt je významně podporován Světovou meteorologickou organizací (*World Meteorological Organization*). Od počátku roku 2008 je jeho součástí také Česká republika. Podle [27] by se měl Meteoalarm.eu v blízké době rozšířit dále na východ, do systému tak bude zapojeno celkem 29 zemí.

Kapitola 5

Vybrané bouřkové případy sezóny 2008

V této kapitole nyní popíšeme pět vybraných bouřkových situací. Stručně zde rozebereme podmínky počasí, které předcházely jednotlivým případům, uvedeme dostupné předpovědní materiály a jak na ně reagovala předpovědní a výstražná služba ČHMÚ a shrneme, jak celá situace probíhala. Další obrazová dokumentace je uvedena v příloze, příp. na přiloženém CD spolu s radarovými a družicovými daty k jednotlivým událostem.

5.1 Používaná data a materiály

Data použitá v této práci nám poskytl ČHMÚ. Využívali jsme především předpovědi modelů ALADIN, GFS a ECMWF, aerologické výstupy, hodografy a data z metod dálkové detekce. Údaje o naměřených úhrnech srážek, výskytu nebezpečných povětrnostních jevů, procentuální pokrytí stanic s bouřkou či vyhodnocení SIVS jsme získali ze zpráv WMCZ53, WOCZ65, SYCZ31 a VMCZ53. Analýzu synoptické situace a hladiny 925 a 850 hPa jsme vykreslovali pomocí programu Visual Weather, používaném v provozu ČHMÚ.

Z výstupů numerických předpovědních modelů jsme uvažovali především prognostické hodnoty CAPE a očekávané srážkové úhrny nad naším územím. Používali jsme výstupy modelů z 00 UTC konkrétního dne s bouřkami (nebo starší výstupy), protože právě tyto výsledky má meteorolog k dispozici v době, kdy se obvykle rozhoduje o vydání či nevydání PVI na současný či následující den. Pro lepší představu o velikosti konkrétních předpovídaných veličin v textu uvádíme maximální modelem vypočítané číselné hodnoty. Model GFS počítá jak hodnotu CAPE, tak hodnotu Lifted indexu LI . Předpověď srážek udává v mm/3 h. Data jsme získávali online z webových stránek www.wetterzentrale.de. Analýzy hladiny 500 hPa a další produkty jsme pro větší přehled studovali z archivu modelu GFS [21]. Ostatní používané materiály získané modelem GFS, jako např. stříh větru ve vrstvě 0–3 km, jsme získali díky projektu ESTOFEX (angl. *European Storm Forecast Experiment*) [24]. Výsledky modelu ECMWF bylo možné získat přes zobrazovací software Visual Weather. Data jsme rovněž získávali z aktuálních výstupů, konkrétně hodnoty CAPE a šestihodinový úhrn srážek nad celou střední Evropou. Data z modelu ALADIN jsme získali z archivu. Potřebné výsledky modelu z půlnočních výstupů jsme vykreslili pomocí grafického programu CHAGAL pracujícího v operačním systému Linux [29]. Oblast našeho zájmu jsme ohraničili 10. a 22. poledníkem

a 47. a 53. rovnoběžkou. Hodnoty CAPE jsme vykreslovali po dvou hodinách, předpověď srážkových úhrnů po šesti hodinách.

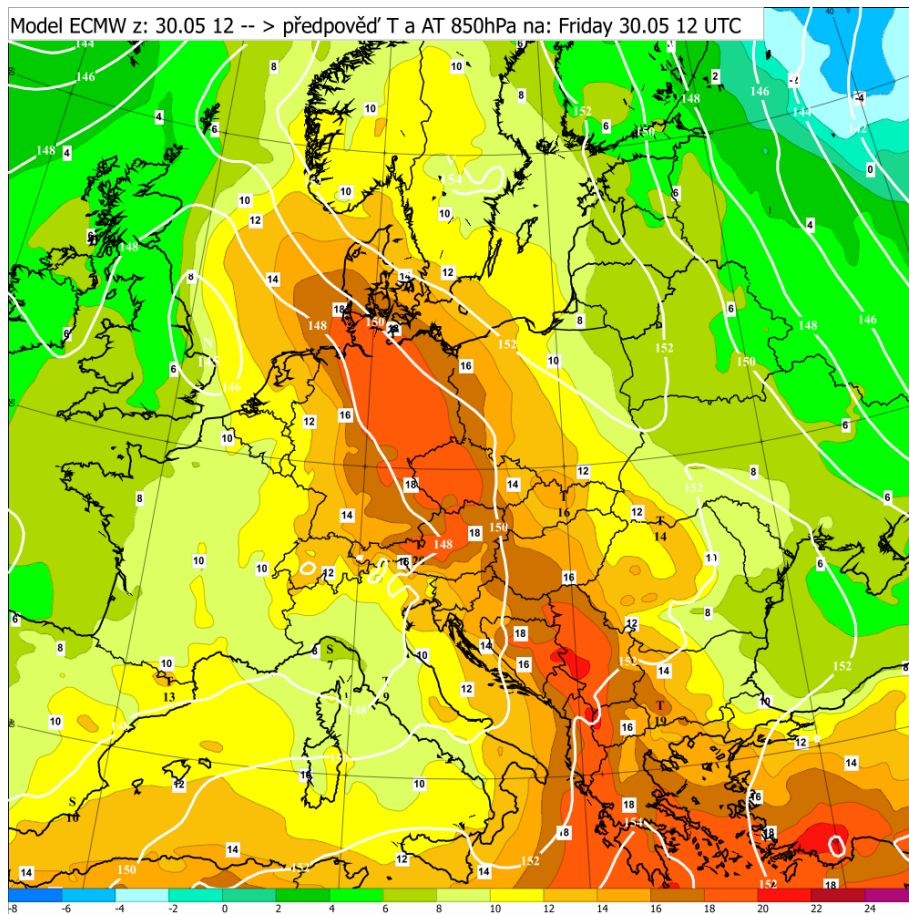
Aerologická data jsou znázorněna ve stůvegramu vykresleném programem GPZT (Grafické a Početní Zpracování zpráv TEMP) používaným v provozu ČHMÚ. Výřez (1000 – 500 hPa) je pro přehlednost omezen na vrstvu atmosféry do cca 6 km nad zemským povrchem. Na pravém okraji grafu jsou uvedeny význačné hladiny větru v jednotkách $^{\circ}/\text{m.s}^{-1}$. Vykreslena je zde křivka zvrstvení (červená), teplota rosného bodu (modrá), izograma směšovacího poměru (žlutá), suchá adiabata (oranžová) a nasycená adiabata (zelená). V grafu jsou znázorněny také polohy hladin VKH, HVK, příp. KKH [$^{\circ}\text{C}$, hPa] a jí příslušející teplota volné konvekce (Tkonv). Zobrazuje se zde také hodnota Faustova indexu *FI*. Nevýhodou tohoto zobrazení je skutečnost, že stůvegram není plochojevný, a tedy vhodný pro výpočet energie. V provozu se používá spíše z historických důvodů. Hodnoty CAPE a CIN jsme tedy získávali z archivu aerologických měření [32]. Data z aerologických sondáží jsme zobrazovali v prohlížeči JSSoundingView. V této práci jsme používali výstupy ze stanic Praha-Libuš a Prostějov.

Byl posuzován také **hodograf větru** - jeho zakřivení pro vrstvu do 3 km nad zemí i jeho tvar. Jednotlivé hodografy ze stanic Praha, Prostějov a Vídeň jsme získali z archivu dostupného na intranetu ČHMÚ [25]. Na hodografech je vypočtena rychlost a směr větru v určitých tlakových hladinách, stříh větru od zemského povrchu do výšky 12 km a také hodnota veličiny SREH (0–3 km). Světle zelenými přímkami je zde naznačen vypočtený pohyb pravostáčivé i levostáčivé supercely, helicity je ale počítána pouze vzhledem k pravostáčivé bouři. Na obrázku bohužel není vyhodnocena délka hodografu, určujeme ji proto subjektivně pomyslným narovnáním křivky hodografu. Pro přehlednost jsme jednotlivé hodografy upravili v programu Adobe Photoshop a zobrazujeme pouze samotný hodograf větru. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v popisku či v textu. Hodografy v původní podobě z [25] jsou přiloženy na CD.

Pro vizualizaci meteorologických dat jsme použili aplikaci JSMeteoView (viz část 3.2). Další aplikací usnadňující práci meteorologa je JSPrecipView, jež umožňuje kombinovaný odhad srážek z meteorologických radarů a srážkoměrných stanic. Pracuje na principu adjustace a optimální interpolace spolu s poskytnutím některých údajů o věrohodnosti příslušných odhadů srážek. K dispozici jsme měli data z radaru Skalky (Germatronik METEOR 360AC) a z radaru Brdy (EEC DWSR-2501 C). Obě tyto aplikace, dostupné na vnitřní síti ČHMÚ, byly použity pro získávání informací k jednotlivým bouřkovým situacím. Údaje o bleskových výbojích byly získány ze sítě detekce blesků CELDN. Celkový úhrn srážek za konkrétní den (od 6 UTC do 6 UTC následujícího dne) a bleskové výboje jsou uvedeny ke každému případu v příloze. Vývoj jednotlivých bouří bylo možné sledovat z pohledu družice MSG prostřednictvím aplikace JSMSGView ve 13 operativních produktech vytvořených různou kombinací jejích spektrálních kanálů [4]. Vybraná data jsou také přiložena na CD.

5.2 31. květen

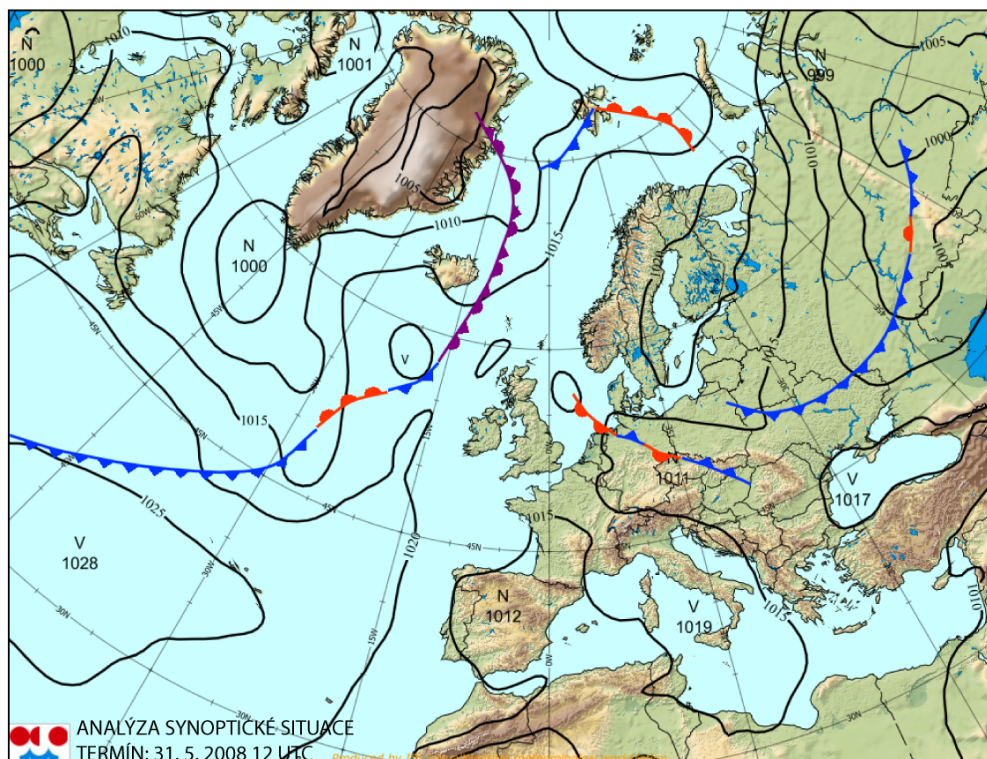
Ve druhé polovině poslední květnové dekády se nad jihozápadní Evropou v přízemním tlakovém poli udržovala rozsáhlá brázda nízkého tlaku vzduchu. Po její zadní straně proudil chladný mořský vzduch z Atlantiku nad Pyrenejský poloostrov a později i nad severní Afriku. Naopak po přední straně této brázdy od 27. května zesílila advekce teplého původem



Obrázek 5.1: Teplota a AT 850 hPa z 30. května 2008 12 UTC, model ECMWF

tropického vzduchu ze severu Afriky přes centrální Středomoří až do střední Evropy. Teplá advekce ve střední Evropě vrcholila 29. až 30. května (viz obrázek 5.1), kdy se teploty v hladině 850 hPa pohybovaly mezi 16 až 21 °C. Střední Evropa a Česká republika se zpočátku nacházela v okrajovém proudění tlakové výše, která zasahovala ze severní Evropy nad Balkán, postupně ale převážil vliv poměrně mělké brázd nízkého tlaku vzduchu od jihozápadu. Ve střední troposféře v hladině 500 hPa ve druhé polovině zkoumané dekády nad střední Evropou zasahoval hřeben od jihovýchodu, který v průběhu 31. května zeslábnul a došlo k odštěpení samostatné anticyklóny se středem nad Dánskem (viz obr. 7 a 6). Izohypsy nad střední Evropou získaly mírné cyklonální zakřivení vhodné pro vývoj vertikálních pohybů.

Jazyk teplého vzduchu byl poměrně úzký, jeho osa 29. 5. 2008 00 UTC probíhala z Libye přes Itálii a Alpy nad Německo, o čemž svědčí například analýza ekvivalentní potenciální teploty v hladině 850 hPa, nicméně tento vzduch byl v tuto dobu nad střední Evropou ještě suchý (viz obr. 2) a proto nedocházelo k rozvoji konvektivní oblačnosti ani vzniku bouřek, i když hodnoty CAPE už v tuto dobu byly poměrně vysoké (viz obrázky 8, 12 a 16 v příloze). První bouřky se vytvořily až 31. května v souvislosti s blížící se studenou frontou, která postupovala na naše území od jihozápadu. Tato zvlněná studená fronta se během 31. května postupně rozpadávala. Příliv tropického vzduchu před frontou zeslaboval, vzduchová hmota



Obrázek 5.2: Analýza synoptické situace z 31. května 2008 12 UTC

se transformovala.

Předpovědní materiály

Už 28. 5. ve 12 UTC **model GFS** předpovídá vysoké hodnoty CAPE a nízké hodnoty LI pro západní a jižní Čechy v termínu 30. 5. 15 UTC a 18 UTC. 31. 5. 18 UTC se CAPE pohybuje kolem hodnoty 1500 J/kg a hodnota LI sahá až k $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Běh modelu z 29. 5. 12 UTC vysoké hodnoty CAPE a LI pro odpoledne 30. 5. přesouvá více k západu (obr. 8), 31. 5. se hodnoty naznačující podmínky vhodné pro vývoj konvekce objevují nejvíce na Moravě a částečně v jižních Čechách (obr. 10). Srážky ale model GFS předpovídá až 31. 5. ve 12 UTC v oblasti Jeseníků (až 4 mm/3 h), v pozdějších odpoledních hodinách pro celou oblast severní Moravy a jižních Čech (obr. 9 a 11). Z poledního běhu modelu z 31. 5. pro 15 UTC byly vysoké hodnoty CAPE předpovídány jen pro severní části České republiky, na 18 UTC už model počítá vysoké hodnoty CAPE na celém území ČR kromě jižní Moravy. Za povšimnutí stojí velmi vysoké hodnoty CAPE (nad 2500 J/kg) a nízké hodnoty LI ($-7\text{ }^{\circ}\text{C}$) nad Německem (Sasko-Anhaltsko, Durynsko a Sasko).

Model ECMWF spuštěný 28. 5. v 00 UTC předpovídá na 30. 5. 12 UTC hodnoty CAPE v jihozápadních Čechách do 1100 J/kg. Běh modelu z 29. 5. 00 UTC předpovídá vysoké hodnoty CAPE na 30. 5. 12 UTC, a to přibližně 1500 J/kg v jihozápadních Čechách (obr. 12). Srážky však nepředpovídal, podle jeho výpočtů se měly první srážky objevit až v odpoledních a večerních hodinách (18 UTC) pouze nad Šumavou do 0,6 mm/6 h (obr. 13).

Pro termín 31. 5. 12 UTC jsou nejvyšší hodnoty CAPE do 1200 J/kg na severní Moravě (obr. 14). Na rozdíl od předchozího výstupu model spuštěný 30. 5. v 00 UTC vypočítal nejvyšší hodnoty CAPE v západních Čechách, max 1717 J/kg. V severním a východním Rakousku dosahují hodnoty CAPE max 1627 J/kg, nad středním Německem až 2042 J/kg. Srážky jsme měly očekávat opět až v odpoledních hodinách, a to pouze nad Šumavou a Českým lesem. Znovu tedy nic nenasvědčovalo významným srážkám konvekčního charakteru. Významnější srážky se podle něj měly objevit až v dopoledních hodinách 31. 5., kdy na Moravě mělo od 6 UTC do 12 UTC spadnout až 3 mm srážek. To odpovídá i hodnotám CAPE, kdy 31. 5. v 12 UTC jsou nejvyšší hodnoty CAPE v pásu přes Moravu a západní Slovensko s maximem 1778 J/kg. Výpočet z 31. 5. 00 UTC ukazuje nejvyšší hodnoty v 31. 5. 12 UTC pro sever ČR a východní Moravu, maximum 1773 J/kg v oblasti Krušných hor na Ústecku. V těchto oblastech by se podle něj měly vyskytnout také srážky, maximálně však 4 mm/6 h.

Výstup modelu **ALADIN** z 30. 5. 00 UTC ukazuje nejvyšší hodnoty CAPE dne 30. 5. v termínu 16 UTC nad jižními, západními a středními Čechami, nad Českým lesem dosahují až 3600 J/kg. Ojedinelá jádra vyšších hodnot CAPE se vyskytují nad Jizerskými horami, Hrubým Jeseníkem a Beskydami (obr. 16). Ve stejných oblastech předpovídá model ALADIN také srážky, nejvíce nad Českým lesem, a to mezi 12 UTC a 18 UTC 6,4 mm (obr. 17). Model spuštěný 31. 5. v 00 UTC zobrazuje nejvyšší hodnoty CAPE v termínu 31. 5. 12 UTC v oblasti severních a východních pohraničních hor, s maximem 2500 J/kg nad Krkonošemi. Uzavřené oblasti vyšších hodnot se nachází také v plzeňském, středočeském a olomouckém kraji. Ve 14 UTC se tyto hodnoty zvýrazňují a rozšiřují dál na sever od našich hor, v 16 UTC dosahují maxima 3400 J/kg v okolí Drážďan. Vysoké hodnoty se však vyskytují po celé severní straně našich hranic od Krušnohoří až po Jeseníky a Beskydy. Objevují se také dva pásy zvýšených hodnot CAPE ve směru jih-sever v Čechách, protažené dále na východ. Zvýšené hodnoty CAPE se objevují i v okolí Doupovských hor. Předpověď na 18 UTC ukazuje vysoké hodnoty CAPE téměř nad celým územím České republiky a jižním Polskem, nejvyšší nad Saskem (viz obr. 18). Srážky model udává v odpoledních hodinách nad oblastmi s vysokou hodnotou CAPE. Nad Českým lesem max 9 mm/6 h, severně od Krkonoš max 8,1 mm/6 h a v Německu severozápadně od Krušných hor se objevuje maximum až 44,2 mm/6 h (viz obr. 19). Model předpokládá, že ve večerních hodinách (mezi 18 a 00 UTC) spadne v oblasti Nížkého Jeseníku až 46,5 mm, severozápadně od Krušných hor nad 45 mm.

Aerologický výstup z Prahy-Libuše 30. 5. ve 12 UTC dokumentuje teplotní inverzi (obr. 2). Je zde patrná zádržná vrstva CIN s hodnotou 572 J/kg, hodnota CAPE dosahuje podle [32] pouze 160 J/kg. Ve výšce asi 2,7 km se vyskytuje velmi suchý vzduch. Teplota volné konvekce je 36,3 °C, Faustův index *FI* má hodnotu -0,6. Všechno tak ukazuje na stabilitu vzduchové hmoty. Aerologický výstup ze stanice Prostějov ve stejném termínu tomu také nasvědčuje. *FI* dosahuje dokonce hodnoty -7,1. Teplotní inverze a výrazná změna vlhkosti vzduchu v hladině AT 850 hPa bude patrně zapříčiněna stříhem větru v této hladině. Na výstupu z 18 UTC je vzduchová hmota výrazně sušší mezi 2 a 3 km. Z půlnočního výstupu 31. 5. ze stanice Praha-Libuš byl spočten *FI* v hodnotě 3,3, což může být předpokladem pro výskyt bouřek. Aerologický výstup 31. 5. 12 UTC na obr. 3 znázorňuje kladnou energii CAPE o velikosti 1051 J/kg (1131 J/kg pro CAPE definovanou pomocí virtuální teploty), CIN pouze 98 J/kg [32]. Teplota volné konvekce se rovná pouze 29,8 °C, avšak *FI* je záporný. Hodnoty směru a rychlosti větru do výšky 10 km nebyly k dispozici. Na výstupu z Prostějova je křivka teplotního zvrstvení téměř shodná s nasycenou adiabatou až do hladiny 500 hPa,

CAPE dosahuje 518 J/kg, teplota volné konvekce má hodnotu 31,1 °C a FI je roven -0,2. Radiosonda vypuštěná z Prahy-Libuše v 18 UTC naměřila vlhký vzduch do hladiny 600 hPa, křivka teplotního zvrstvení se protíná s teplotou rosného bodu.

Všechny **hodograpy větru**, které máme z 31. 5. k dispozici, vykazují nulovou hodnotu SREH. Na půlnočních výstupech ze stanic Prostějov a Vídeň přesahují hodnoty stříhu větru $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, což může značit prostředí příznivé pro tvorbu supercel. Jejich délku odhadujeme na $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Hodograf z Prostějova je pravostáčivý (obr. 4), z Vídně spíše levostáčivý. Polední výstup ze stanice Prostějov má poměrně chaotický tvar, jeho délku jsme odhadli na $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Stříh větru dosahuje $5,66 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Hodograf z Prahy-Libuše v 18 UTC (obr. 5) je spíše přímočarý, délku odhadujeme na $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Stříh větru dosahuje pouze $2,19 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Předpovědní služba ČHMÚ a SIVS

Na den 30. 5. ani 31. 5. 2008 nebyla vydána žádná výstražná informace. Na základě předpovědních materiálů, které byly k dispozici z výstupu 31. 5. 00 UTC, se neočekávaly hodnoty přesahující limity pro vydání PVI. V předpovědi ČHMÚ na 31. 5. se objevilo pouze upozornění na bouřky pod všeobecnou předpovědí tohoto znění: „Upozornění: V bouřkách se mohou ojediněle vyskytnout přívalové srážky, kroupy a silný nárazový vítr.“. Výstražná informace vysokého stupně nebezpečí PVI 19/08 byla vydána až 1. 6. 10:13 SELČ s platností od 1. 6. 11:00 do 2. 6. 2:00 SELČ na bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy, která byla vyhodnocena jako částečně úspěšná.

Vývoj situace z pohledu metod dálkové detekce

Během pátku 30. 5. 2008 panovalo v České republice velmi teplé počasí, po většinu dne bez oblačnosti. Průměrné maximální teploty se pohybovaly mezi 28 a 29 °C, nejvyšší teplota 32,2 °C byla naměřena v Nedrahovicích - Rudolci. Bouřky se vyskytovaly pouze nad Německem, Rakouskem a severní Itálií. Ve večerních hodinách se na radaru vyskytly meteorologické cíle nad jižní Moravou a západními Čechami, ale první nebezpečné bouřky z tohoto období se vyskytly až 31. 5. 2008.

Dopoledne 31. 5. bylo nad Českou republikou jasné počasí. První bouřky v dosahu našich radarů se začaly objevovat v 10 UTC ve slovenských Tatrách. Kolem 11 UTC se další bouřky tvořily v Moravskoslezských Beskydech, Hrubém Jeseníku, na polské straně Krkonoš a německé straně Krušných hor. Po 12 UTC bouře vznikaly i na Šumavě. Nad Českým středohořím se bouřky začaly vyskytovat až v odpoledních hodinách. Večer už bouřky zasahovaly celý Středočeský kraj a severní Čechy. Stejně jako bouřky nad Saskem vykazovaly multicelární strukturu. Nové bouřky vznikaly proti směru proudění, bouře tak pomalu postupovaly spíše k severovýchodu. V jižních Čechách se po 22 UTC vyskytla silná bouře, která postupovala severozápadně a ustala až v brzkých ranních hodinách 1. 6. 2008.

Po 13 UTC začaly bouře nad Německem západně od Krušných hor vykazovat z pohledu družice MSG studené prstence (produkt IR-BT), které mohou naznačovat potenciální nebezpečnost těchto bouří. Na denním produktu VIS-IR jsou ve stejné době patrné přestřelující vrcholy. Ve 14:30 UTC se tvoří bouře nad Polskem severovýchodně od Ostravy, které postupují jihozápadně nad naše území. Po 16 UTC se nad Českou republikou na družicových snímcích objevují ojedinělé Cb s přestřelujícími vrcholy na Litoměřicku pod Českým středohořím a

nad Broumovským výběžkem. Kolem 18 UTC se začínají objevovat ojedinělá jádra vysoké odrazivosti nad Středočeským krajem, které se s postupem času přesouvají k severovýchodu. Na družicových snímcích po 20 UTC také vykazují studený prstenec.

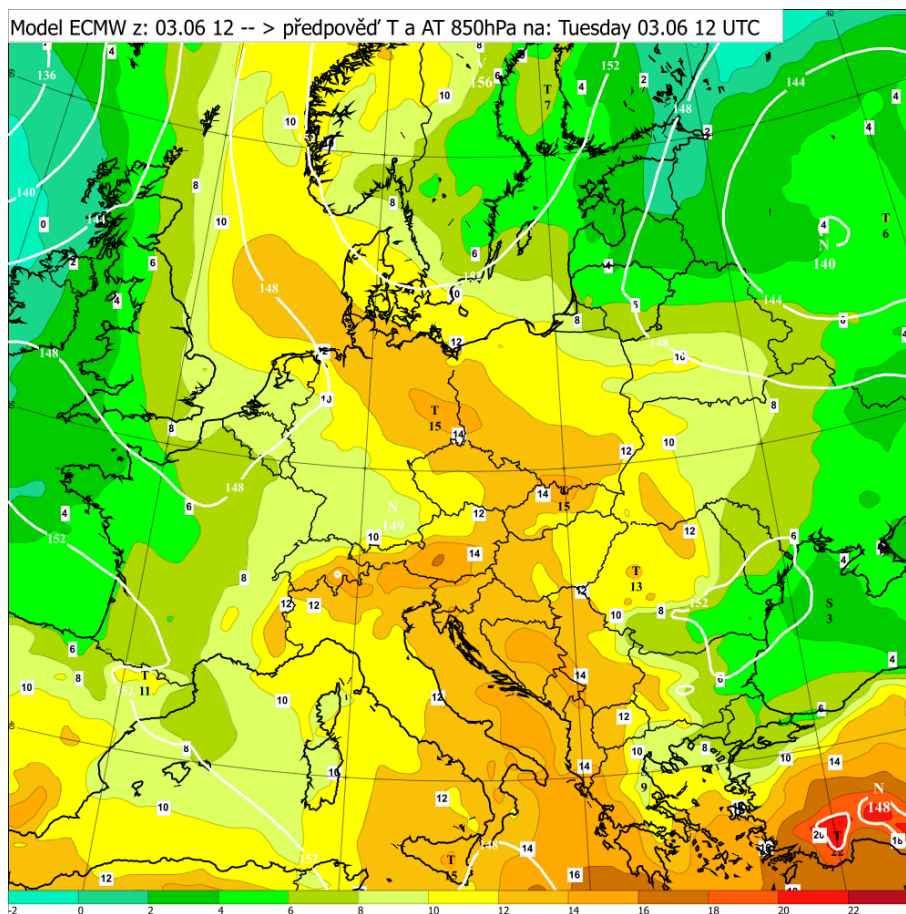
Vyhodnocení situace a shrnutí

V oblasti rozpadávající se fronty se u nás odpoledne, večer a v noci 31. května vyskytly místy bouřky (40 % stanic s bouřkou), zejména v severních oblastech republiky (obr. 20). Nejvíce srážek bylo naměřeno po noční bouřce na Českobudějovicku v obci Ledenice u Českých Budějovic: 58 mm. Denní srážkový úhrn v Českých Budějovicích činil 46,8 mm, v Poděbradech 46,5 mm. Nad Německem dosahovaly srážkové úhrny ojediněle přes 100 mm. Jednalo se pouze o lokální srážky (viz obr. 21). Silné krupobití se vyskytlo na německé straně Krušných hor. V České republice bylo krupobití zaznamenáno ojediněle v Šindelové-Oboře v Krušných horách (velikost krup dosahovala 2 až 2,5 cm), v Hojsově Stráži na Šumavě a v Ostravě-Porubě. Význačné krátkodobé (hodinové) srážkové úhrny byly hlášeny např. ze Šindelové-Obory: 19 mm, v Praze-Kbelích a v Poděbradech po 28 mm. Uvedené hodnoty splňovaly kritéria určená pro vydání PVI 2. stupně na bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy. Podle sdělovacích prostředků (MF-Dnes) byly přívalovým deštěm nejvíce postíženy okresy Nymburk, Mladá Boleslav a Praha-východ, kde byly zatopené sklepy, popadané stromy a nánosy bahna na komunikacích. Po nočním přívalovém dešti se rozvodnil Dobrovodský potok u Českých Budějovic. Odhad škod se pohyboval v řádu několika miliónů korun.

Předpovědní materiály pro 30. 5. 2008 modelu GFS zcela správně předpokládaly, že i přes vysoké hodnoty CAPE ke srážkám nad naším územím nebude docházet. Podobně na tom byla i předpověď modelu ECMWF, výstup modelu ALADIN však poukazoval na předpokládaný výskyt srážek v jihozápadních Čechách. Na aerologických výstupech byla patrná zádržná vrstva, která podle předpokladů nebyla překonána a k výrazné konvekční činnosti nad naším územím nedošlo. Předpovědi modelů pro 31. 5. 2008 se shodovaly více. Hodnoty CAPE dosahovaly vysokých hodnot převážně v severních oblastech České republiky a nad severovýchodním Německem. Silné bouřky se pak v těchto oblastech skutečně vyskytly. Co se týče předpokládaných srážkových úhrnů, výrazně nejlépe situaci vystihl model ALADIN. Vzhledem k danému prostorovému rozlišení jednotlivých modelů by bylo překvapivé, kdyby tomu tak nebylo. Výrazně podhodnoceny však byly srážkové úhrny ve středočeském kraji. Žádný z předpovědních materiálů nepoukazoval na noční bouřku v jižních Čechách.

5.3 3. červen

Začátkem měsíce června se zvlněná studená fronta nad naším územím rozpadla, ale v mělké přízemní brázdě nízkého tlaku vzduchu vyplněné teplým vlhčím labilním vzduchem se během dne 1. 6. 2008 (ojediněle i v noci) vyskytly místy bouřky (58 % stanic s bouřkou), zejména v Čechách. V hladině AT 500 hPa se naše území nacházelo v hřebeni vyššího tlaku vzduchu, zatímco západní Evropa ležela v poměrně mělké brázdě nižšího tlaku vzduchu. Severozápadně od Britských ostrovů se nacházela tlaková níže. Jazyk teplého vzduchu, který ve volné troposféře zasahoval nad střední Evropu od jihovýchodu, se udržel, ale byl méně výrazný (obr. 5.3).

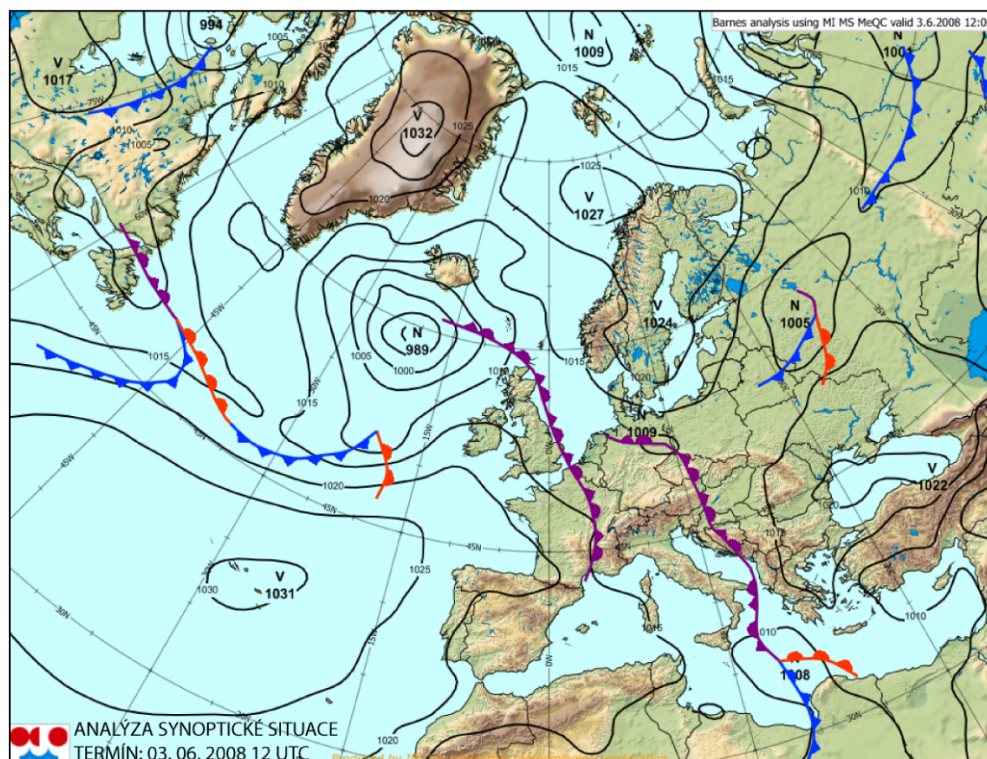


Obrázek 5.3: Teplota a AT 850 hPa z 3. června 2008 12 UTC, analýza modelu ECMWF

Nad střední a západní Evropou se udržovala oblast nízkého tlaku vzduchu a Česká republika ležela na její přední straně. Mezi tímto útvarem a tlakovou výší nad východní Evropou pokračoval příliv velmi teplého vzduchu od jihu (obr. 24 a 25). Tlaková níže a s ní spojený frontální systém postupovaly velmi zvolna od jihozápadu na naše území. Na studené frontě se vyskytovaly bouřky s nebezpečnými povětrnostními jevy. Přes Českou republiku tato fronta (už jako studená okluze) začala přecházet od jihozápadu v noci z 2. 6. na 3. 6. (viz obr. 5.4).

Předpovědní materiály

Model GFS spuštěný 3. 6. v 00 UTC předpovídá vysoké hodnoty CAPE v pásu přes Německo, Čechy, Rakousko a dále přes Slovinsko k Chorvatsku. Maximální hodnoty CAPE nad naším územím vystoupaly až k 2000 J/kg v severozápadních Čechách, hodnoty *LI* dosahovaly $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve středních a severních Čechách (viz obr. 26). Srážky konvekčního charakteru model GFS očekával v Čechách a na Moravě v souvislosti s přechodem studené fronty. Maximální úhrny srážek mezi 9 a 12 UTC se předpokládaly ve středních Čechách v okolí Tábora (až 5 mm) a v Krušných horách (6 mm). Mezi 12 a 15 UTC model předpovídal v celých Čechách kolem 3 mm srážek, nejvíce pak 6 mm v Krušných horách (obr. 27). Od 15 do



Obrázek 5.4: Analýza synoptické situace ze dne 3. června 2008 ve 12 UTC

18 UTC mělo podle výpočtů modelu GFS v Čechách spadnout pouze 2 mm, severovýchod Čech beze srážek, ale v pásu z jihozápadní Moravy po severozápadní Moravu až 4 mm. Toto srážkové pásmo se pak mělo přesunovat dále k východu. Model z 3. 6. 12 UTC ukazuje vysoké hodnoty CAPE nad celou Českou republikou, maxima v 18 UTC stále kolem 2000 J/kg. Na většině území dosahovaly hodnoty LI -4 °C, v severních Čechách až -5 °C.

Předpověď **modelu ECMWF** vypadala podobně. Běh modelu z 2. 6. 00 UTC ukazoval nejvyšší hodnoty CAPE nad Dolním Saskem do 1000 J/kg. Srážky model předpovídal v pásu vedoucího přes Německo, Čechy, Rakousko a dále k jihovýchodu. Maximální úhrny srážek za šest hodin potom očekával 3. 6. 2008 v 18 UTC v oblasti západní a jihozápadní části republiky, a to až 11 mm (Krušné hory). Modelu z 3. 6. 00 UTC vypočítal maxima hodnoty CAPE více na východ, nad Dolním Saskem a Saskem-Anhaltskem (obr. 28). Srážky byly podle modelu ECMWF očekávány do 12 UTC v západních a jihozápadních Čechách s maximem 16 mm/6 h v Krušných horách (obr. 29). Mezi 12 a 18 UTC už model předpovídal srážky na celém území České republiky s maximálními úhrny do 10 mm v oblasti Telče, Šumavy a jihozápadní části Krušných hor.

Podle běhu **modelu ALADIN** z 3. 6. 00 UTC měla už ve 12 UTC CAPE v jižních Čechách přes 1300 J/kg, jinak se vyšší hodnoty vyskytovaly také na jižní Moravě. Ve 14 UTC se vysoké hodnoty CAPE přesunuly spíše nad střed našeho území a postupem času postupovaly dále na severovýchod. Maximální hodnoty CAPE se pak ukazovaly na předpověď pro 18 UTC od Saska přes severní Čechy a Vysočinu k celému území Moravy. Maximální hodnoty se pohybují od 2436 J/kg do 1601 J/kg ve středních Čechách (viz obr. 30). Srážky model ALADIN očekával už v dopoledních hodinách nad celou Českou republikou vyjma severních Čech a východní

Moravy. Srážkový úhrn 51,5 mm/6 h předpovídal nad Bavorskem v blízkosti našich západních hranic. Do 18 UTC se déšť očekával nad celým naším územím, maximum 57,2 mm/6 h se vyskytovalo nad Saskem, v jižních Čechách až 24,6 mm/6 h (obr. 31). Do půlnoci se vyšší úhrny vyskytovaly v severních Čechách.

Aerologické výstupy z tohoto období z Prahy-Libuše poukazují na velmi vlhký vzduch nad naším územím (obr. 22). Teplota konvekce se 3. 6. pohybuje v rozmezí od 27,6 °C v 00 UTC do 20,8 °C ve 12 UTC, v průběhu odpoledne mírně stoupla a během noci na 4. 6. klesla až k 17,2 °C. *FI* nabývá záporné hodnoty pouze 3. 6. v 12 UTC (-1,0) a 4. 6. v 00 UTC (-0,3), jinak se pohybuje mírně nad nulou. 3. 6. v 00 UTC je na výstupu patrná noční inverze teploty a s ní spojená silná zádržná vrstva CIN 217,7 J/kg. Ve 12 UTC je poloha KKH relativně nízko, CAPE podle [32] dosahuje 287,9 J/kg (327,4 J/kg spočítaná pomocí virtuální teploty). Později odpoledne už hodnota CAPE nepřesahuje 200 J/kg, CIN řádově v desítkách J/kg. Z aerologických výstupů ze stanice Prostějov jsme měli k dispozici pouze půlnoční výstupy. Vzduch v této oblasti je v nižších hladinách poněkud sušší. 3. 6. v 00 UTC je také zřetelná teplotní inverze. Podle [32] dosahuje CAPE v 12 UTC 879,4 J/kg (s virtuální teplotou až 979,5 J/kg). 4. 6. v 00 UTC CAPE 269,3 J/kg (318,9 J/kg).

Hodografy z tohoto dne většinou nenasvědčovaly výskytu nebezpečných doprovodných jevů očekávaných bouří. Hodograf sestavený z aerologického výstupu z Vídně nemá výraznou strukturu, hodnota SREH v 00 UTC je nulová, ve 12 UTC dosahuje 96 m².s⁻². Střih větru nepřesahuje hodnotu 5.10⁻³ s⁻¹, v 00 UTC 4,94.10⁻³ s⁻¹. Půlnoční výstup z Prahy-Libuše také ukazuje spíše chaotický tvar hodografu, hodnota střihu je však vysoká: 6.68.10⁻³ s⁻¹, což může poukazovat na prostředí příznivé pro tvorbu supercel. Hodnota SREH je ale nulová. V 6 UTC přesahuje střih větru 5.10⁻³ s⁻¹, hodnota SREH 16 m².s⁻². V dalších termínech se hodnota SREH příliš nemění, střih větru klesá pod 3.10⁻³ s⁻¹ (obr. 23). Tvar hodografu ze stanice Prostějov je velmi chaotický, hodnoty SREH dosahují v 00 UTC k 75 m².s⁻². Velmi zajímavý je zde střih větru, jeho hodnota v 00 UTC dosahuje 9,47.10⁻³ s⁻¹, v 12 UTC 6,61.10⁻³ s⁻¹.

Předpovědní služba ČHMÚ a SIVS

Už 2. 6. v 10:37 SELČ byla vydána předpovědní výstražná informace PVI 20/08 2. stupně na bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy s platností od 2. 6. 12:00 SELČ do 5. 6. 3:00 SELČ pro kraj Karlovarský, Plzeňský a Jihočeský. Pro zbývající kraje na území Čech platila výstraha až od 3. 6. 12:00 UTC do 5. 6. 3:00 SELČ. Během odpoledne 2. 6. se v jihozápadní polovině Čech očekávaly bouřky, ojediněle doprovázené krupobitím, přívalovými srážkami a silným nárazovitým větrem. 3. 6. se předpokládá výskyt bouřek i na ostatním území Čech. Lokálně se očekávaly úhrny srážek kolem 50 mm. Výstražná informace PVI 20/08 byla následující den v 15:10 SELČ nahrazena a územně rozšířena pomocí PVI 21/08 s platností pro celé území České republiky na bouřky s doprovodnými jevy, které byly očekávány v době od 3. 6. 13:00 do 5. 6. 6:00 SELČ. Srážková činnost měla podle informací uvedených ve výstraze během noci z 4. 6. na 5. 6. od severu zvolna ustávat.

Vývoj situace z pohledu metod dálkové detekce

První bouřky se začaly tvořit už v noci z 2. 6. na 3. 6. 2008 nad Českým lesem a postupovaly zvolna k severozápadu. Ojedinelá bouře se vyskytla také v jižních Čechách. Přibližně ve 4 UTC se bouře vyskytovaly podél celých našich jihozápadních hranic a postupovaly směrem na sever. Přibližně v 9 UTC se vyskytovaly bouře také v jižních Čechách, později se začaly tvořit bouře nad německou stranou Krušných hor, v pásu od Znojma po Olomouc a nad Broumovským výběžkem. Kolem 14 UTC už se bouře vyskytovaly nad celým územím České republiky kromě východní Moravy. Tam se bouře vyskytly až kolem 16 UTC. Bouře se pohybovaly většinou na sever, severovýchod, jen v západních Čechách se multicelární bouře šířily spíše směrem na jihovýchod a v severovýchodních Čechách směrem na západ. Ve večerních hodinách se bouře vyskytovaly pouze nad Vysočinou, severními a středními Čechami a postupně se rozpadávaly.

Z pohledu družice MSG je dobře patrná studená fronta postupující v noci na 3. 6. a během dne zvolna k východu. Na produktu VIS-IR jsou jednoduše rozpoznatelné jednotlivé přestřelující vrcholy. Žádná z bouří nevykazuje na družicových snímcích v IR-BT ani Storm potenciální nebezpečnost.

Vyhodnocení situace a shrnutí

Pás oblačnosti studené fronty, na kterém se vyskytovaly četné přeháňky a bouřky, se zvolna přesouval od jihozápadu na naše území. Ve druhé polovině noci na 3. 6. 2008 se vyskytly bouřky v jihozápadních Čechách, během dne i na ostatním území (84 % stanic se srážkami, 56 % stanic s bouřkou). Tato fronta nad naším územím v nevýrazném přízemním tlakovém poli ještě setrvala do 4. 6., v jejím okolí se vyskytovaly na našem území další srážky (91 % stanic se srážkami, 46 % stanic s bouřkou). Odpoledne a večer se v bouřkách místy vyskytly přívalové srážky, nejčastěji v Libereckém kraji. Nejvyšší hodinové úhrny však byly zaznamenány v Plzeňském kraji: Terešov na Rokycansku 35 mm, Plasy 57 mm. Nejvyšší denní srážkový úhrn byl naměřen u vodní nádrže Hamry na Chrudimsku (77 mm) a ve Velkém Dřevíči na Náchodsku (70 mm). Kroupy padaly např. na Žďársku a na Lysé hoře v Beskydech. Nejvyšší náraz větru byl hlášen z Náměšti nad Oslavou (20 m.s^{-1}).

Předpověď srážkových úhrnů numerických modelů bylo třeba brát spíše orientačně a raději se spolehnout na vlastní zkušenosti meteorologů. Model GFS a ECMWF ale poměrně dobře předpověděl oblast očekávaných výraznějších srážek. Maxima šestihodinových (tříhodinových) úhrnů ale počítali hlavně v Krušných horách, ve skutečnosti byly větší srážkové úhrny naměřeny v západních a východních Čechách. Model ALADIN v dopoledních hodinách srážky výrazně nadhodnotil, odpoledne už ale dobře určil jak polohu, tak i množství srážek. Žádný z modelů nepostihl výrazný srážkový úhrn na Plzeňsku, Pelhřimovsku a Žďársku, kde podle odhadů srážkových úhrnů z radarů a srážkoměrných stanic spadlo přes 60 mm. Údaje z aerologických měření a z nich odvozený předpokládaný průběh počasí odpovídaly skutečnému vývoji počasí v České republice. Výstražná informace PVI 20/08 byla vyhodnocena jako částečně úspěšná, protože se bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy vyskytly také v Moravskoslezském, Olomouckém a Jihomoravském kraji. PVI 21/08 byla vyhodnocena jako úspěšná.

5.4 25. červen

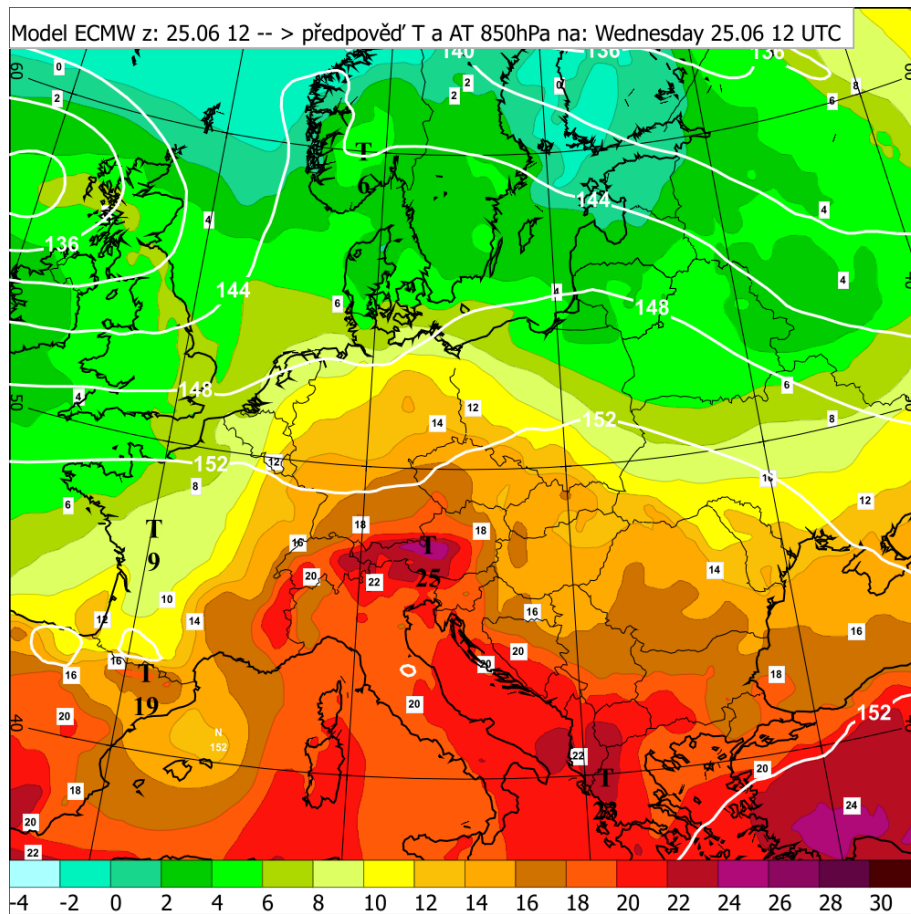
Začátkem třetí červnové dekády k nám přechodně proudil od jihozápadu tropický vzduch, teplota vzduchu v hladině AT 850 hPa dosahovala 20 °C. Jeho příliv byl ukončen 23. 6. přechodem studené fronty. V týlu tlakové níže, která se přesouvala z jižní Skandinávie zvolna k severovýchodu, k nám od severozápadu proudil chladnější vzduch - nejnižší teploty v hladině AT 850 hPa se pohybovaly kolem 8 °C. Od severozápadu k nám zasahoval výběžek vyššího tlaku vzduchu, přes Bavorsko a Rakousko postupovala frontální vlna. V hladině AT 500 hPa zasahoval nad jižní Evropu od jihozápadu hřeben vysokého tlaku vzduchu (obr. 36 a 37). Nad Českou republikou se vyskytovalo silné západní proudění, osa jet streamu se nacházela severně od našeho území. Z Atlantiku současně směřovala k Britským ostrovům tlaková níže. Tato tlaková níže vedla ke změně proudění nad západní a střední Evropou - to se stáčelo na jihozápadní a vytvořila se frontální vlna, která postupovala přes střední Evropu od západu k východu až severovýchodu. V jejím teplém sektoru pronikl do České republiky velmi teplý vzduch od jihozápadu, teplota v hladině 850 hPa dosáhla až 20 °C na jihozápadě Česka (obr. 5.5). Silná studená fronta tohoto frontálního systému začala přecházet přes naše území ve středu 25. 6. v 16 UTC (Praha-Ruzyně) a do půlnoci SELČ přešla v silném západním výškovém proudění nad celým územím k východu. Za studenou frontou se v hladině 850 hPa krátkodobě ochladilo o 2 až 6 °C. Poté se k nám od západu rozšířil nevýrazný výběžek vyššího tlaku vzduchu. Synoptická situace z 25. 6. 12 UTC je znázorněná na obr. 5.6.

Předpovědní materiály

Všechny potřebné údaje z **modelu GFS** nám bohužel nebyly k dispozici. Zajímavé ale jsou údaje o relativní vlhkosti (obr. 39) a teplotě rosného bodu (obr. 38), které poukazují na vlhký vzduch nad Německem a „bazén“ vlhkého vzduchu nad naším územím. Od jihovýchodu se k nám nasouvala velmi vlhká vzduchová hmota, kde teplota rosného bodu lokálně dosahovala až 20 °C.

Model ECMWF spuštěný 23. 6. 00 UTC předpovídá na 25. 6. nejvyšší hodnoty CAPE nad Čechami v 18 UTC s maximem 1059 J/kg, výraznější srážky až mezi 18 a 00 UTC 26. 6. nad Moravou do 6 mm, běh modelu z 12 UTC počítá až s 8 mm. Běh modelu z 24. 6. 00 UTC už počítá vysoké hodnoty téměř nad celým územím České republiky, maxima v 18 UTC v jižní části Čech, východní Bavorsko až 1581 J/kg. Největší srážkový úhrn by se podle něj měl vyskytnout západně od Českých hranic, a to 16 mm/6 h do 18 UTC. Do 00 UTC 26. 6. model očekává nad Moravou srážkový úhrn 8 mm/6 h. Model z 25. 6. 00 UTC už nad naším územím tak vysoké CAPE nepočítá, v 15 UTC v západních Čechách a v Krušnohoří do 900 J/kg. V 18 UTC v Čechách dosahuje CAPE 1072 J/kg, vysoké hodnoty se objevují také na jižní Moravě (obr. 40). V 21 UTC se vysoká CAPE přesunula na jihovýchodní Moravu, kde bylo spočítáno maximum 1206 J/kg. Srážkově významnou oblast posouvá v souvislosti se studenou frontou z Německa na východ s úhrny do 15 mm/6 h v 12 UTC, v 18 UTC západně od českých hranic s maximem 12 mm/6 h a v 00 UTC 26. 6. 10 mm/6 h nad východní Moravou (obr. 41).

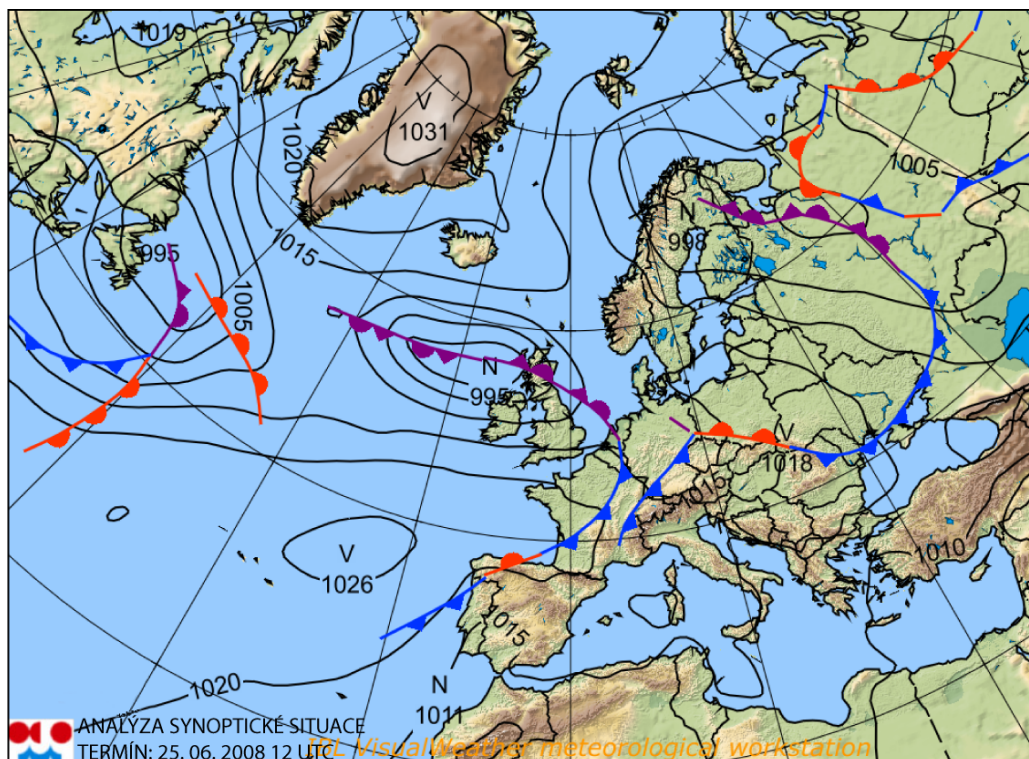
Protože případ 25. 6. byla mimořádná událost, vykreslili jsme si potřebné grafy CAPE po jedné hodině. **Model ALADIN** z 25. 6. 00 UTC dával vysoké hodnoty pro západní část našeho území v souvislosti se zvlněnou studenou frontou. Maxima v 14 UTC dosahovala



Obrázek 5.5: Teplota a AT 850 hPa z 25. června 2008 12 UTC, model ECMWF

1605 J/kg v jižních Čechách. V 17 UTC se přes 2000 J/kg vyskytuje v severním Rakousku, v západních Čechách do 1200 J/kg (obr. 42). Vyšší hodnoty CAPE se přesunují ze západních Čech na severozápad, v 20 UTC už CAPE nepřesahuje 800 J/kg a dále se její hodnoty snižují. Srážky mezi 12 a 18 UTC model očekává na severozápadě našeho území, maximum nad Bavorskem 18,2 mm. Do 26. 6. 00 UTC by mělo nejvíce srážek spadnout na severu našeho území, v oblasti Jeseníku až 28,2 mm, v západních Čechách a na jižní Moravě do 3 mm. Nad Polskem se vyskytuje maximum 43,9 mm (obr. 43).

Na **aerologických výstupech** z Prahy-Libuše si lze povšimnout silného větru ve vyšších vrstvách, které je spojeno s výskytem výrazného západního proudění ve vyšších hladinách (obr. 34). Výrazný stříh větru je ukončen v hladině 500 hPa. 25. 6. v 00 UTC se ve středních vrstvách atmosféry (4 až 5 km) vyskytoval sušší vzduch, teplotní inverze při zemi, teplota konvekce 25 °C a záporný Faustův index, CAPE i CIN nevýrazná. V 6 UTC se už vzduch zvlhčil a teplotní inverze se nadvzdela, CIN dosahoval hodnoty 125 J/kg. Ve 12 UTC už teplota konvekce dosahovala 31,1 °C, *FI* -0,8. CAPE byla 294 J/kg (336 J/kg podle virtuální teploty) a patrná zádržná vrstva CIN 111 J/kg (73 J/kg). Očekávala se destabilizace této zádržné vrstvy. Pod 3 km se vyskytoval nepatrně sušší vzduch. V 18 UTC už byla situace v Praze-Libuši zcela jiná. Na aerologickém výstupu zůstává teplota s rostoucí výškou téměř



Obrázek 5.6: Analýza synoptické situace z 25. června 2008 12 UTC

konstantní až do přibližně 1,5 km, poloha VKH a KKH jsou velmi nízké. Teplota konvekce je pouze 17,8 °C, hodnota FI nabývá kladných hodnot, a to 1,3. Přibližně ve 4 km se vyskytuje silné západní proudění o rychlosti až 39 m.s⁻¹, které je způsobeno vtokem vzduchu do týlu bow echa, tzv. *rear-inflow jet*. Hodnota CAPE je pouze v řádu jednotek J/kg, vyskytuje se zde silná zádržná vrstva CIN 324 J/kg (288 J/kg dle virtuální teploty). 26. 6. v 00 UTC je už situace po přechodu studené fronty klidnější, přízemní izotermie a následně inverze teploty (CIN 118 J/kg), teplota konvekce 23,9 °C a FI -0,7, vítr západní ve 4 km o rychlosti 18 m.s⁻¹.

Hodografy ze stanice Praha-Libuš vykazovaly převážně přímočarý charakter v jihovýchodním směru. Helicita byla vyčíslena v 00 UTC na 110 m².s⁻², v 6 UTC 39 m².s⁻² a ve 12 UTC až 185 m².s⁻². Střih větru se v průběhu dne pohybuje do 5,10.10⁻³ s⁻¹. Délku hodografu odhadujeme na 30–35 m.s⁻¹, v případě z 12 UTC až na 40 m.s⁻¹. V 18 UTC je SREH nulová, ale střih větru dosahuje svého maxima: 11,2.10⁻³ s⁻¹ (obr. 35). Jeho délku velice hrubě odhadujeme na 90 m.s⁻¹. Tvar hodografu ze stanice Prostějov z 00 a 12 UTC se velmi podobá hodografům vykresleným z údajů naměřených v Praze-Libuši, jen SREH se pohybuje řádově v desítkách m².s⁻² a střih větru má 6,15.10⁻³ s⁻¹ a 5,47.10⁻³ s⁻¹, tedy v obou případech překračuje pomyslnou hranici pro tvorbu supercel. Hodografy z Vídně mají také spíše přímočarý charakter, ale na konci stočený zpět. V odpoledních hodinách přesahuje veličina SREH 190 m².s⁻². Hodografy tak poukazují na velmi příznivé prostředí pro tvorbu supercelárních bouří.

Předpovědní služba ČHMÚ a SIVS

Tento den se očekával přechod frontální vlny a s ním spojené pronikání velmi teplého vzduchu od jihozápadu, později odpoledne, večer a v průběhu první poloviny noci na 26. 6. studená fronta od západu. Meteorologové předpokládají výskyt silnějších bouří doprovázených ojedinělými přívalovými srážkami s úhrnem kolem 35 mm, krupobitím a nárazovým větrem nad 20 m.s⁻¹. Největší pravděpodobnost výskytu nebezpečných jevů byla na severozápadě a severu Čech a v Jeseníkách. Rozhodují se ale, zda vydat PVI nebo jen uvést upozornění pod předpovědí. Po konzultaci CPP s RPP byla v 10:52 SELČ vydána výstraha PVI 24/08 na bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy pro severozápadní a severní Čechy, konkrétně pro kraj Karlovarský a Ústecký s platností od 12:00 do 0:00 SELČ a pro Středočeský, Královéhradecký, Liberecký a Olomoucký kraj s platností od 15:00 do 3:00 SELČ následujícího dne.

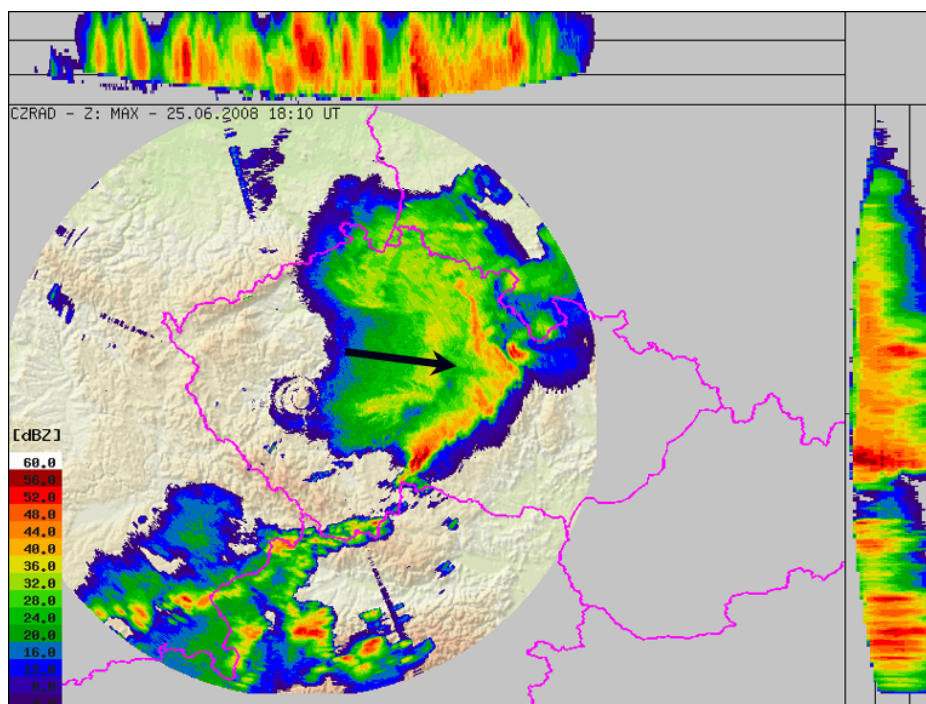
Události, které potom následovaly, popíšeme z pohledu meteorologů ve službě (vycházeli jsme přitom z poznámek o průběhu denní a noční služby na CPP a z rozhovorů s několika meteorology). V čase vydání výstrahy se už vyskytují první bouřky nad Vestfálskem a Saskem. V 13:00 UTC bylo ve Varnsdorfu naměřeno 28 mm srážek za hodinu, ale oblast byla zahrnuta v PVI a jednalo se o zatím ojedinělý jev. V 15:00 UTC bylo naměřeno přes 30 mm/h v Žatci (mapa s informacemi o měření z meteorologických stanic však byla podle některých pracovníků ČHMÚ aktualizována se zpožděním). IVEJ nevydána, protože situace nebyla posouzena jako extrémní událost. Přibližně v 15:20 UTC přes naše území začíná postupovat studená fronta v podobě linie bouří od západu přes Plzeňský kraj, pro který nebyla vydána PVI. Z RPP Plzeň nebyla hlášena žádná zpráva o nebezpečných jevech ani o návrhu na novou PVI či IVEJ. Protože squall line postupovala rychle k východu (odhady a měření srážkových úhrnů dosahovaly maximálně 20 mm/h), nebyly hlášeny kroupy na stanicích a nejsilnější nárazy větru byly do 21 m.s⁻¹, PVI vydána nebyla.

Když se situace začala vyvíjet jinak, než se předpokládalo, CPP konzultovalo situaci také s HZS (16:45 UTC) a varovalo je, že se bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy vyskytnou i mimo územní platnost PVI. Dodatečné vydání PVI však nepožadovali. Zároveň v tomto období (16:35 až 17:00 UTC) nejsou dočasně k dispozici data z radaru Brdy. K 17:00 UTC byl dosud zaznamenán nejsilnější náraz větru s hodnotou 25 m/s (Praha–Karlov), všechny stanice hlásily srážky do 30 mm, bez krupobití - tyto hodnoty nepřesahovaly kritéria pro vydání IVEJ. První stanice hlásí nárazy nad 30 m/s (Chotusice – 33 m/s) až v 18 UTC, což už splňuje kritérium pro extrémní stupeň nebezpečí. Mezitím stále probíhaly desítky telefonátů, připravovaly se předpovědi a konala se konzultace mezi jednotlivými pobočkami. Po 19 UTC se srážky dostávají mimo dosah radaru Brdy, postup bouří na Moravě lze sledovat pouze pomocí radarů ze sousedních států. Kvůli výpadku radaru Skalky není k dispozici radarový odhad srážek. IVEJ vydána nebyla. Po 20 UTC probíhají telefonáty s vedoucími pracovníky a během noci je sepisována předběžná zpráva o průběhu počasí.

Vývoj situace z pohledu metod dálkové detekce

Tento den byl bohužel radar Skalky mimo provoz. První bouřky se v dosahu radaru Brdy vyskytly kolem 10 UTC, kdy na německé straně Krušných hor postupoval menší konvekční komplex na severozápad. Současně se nad Německem vyskytovaly supercelární bouře. Kolem

13 UTC bouře vznikaly také v severních Čechách. Podle střeoevropské radarové sítě CERAD se kolem 11:30 UTC začal formovat pás bouří nad Francií a Německem, který postupoval dále na východ a v 15 UTC zasahuje tato výrazná konvekční oblačnost také západní Čechy. Přibližně v 15:30 UTC jsou na radaru patrná dvě výrazná jádra vysoké radarové odrazivosti odchylovající se vpravo od směru pohybu ostatních meteorologických cílů s tzv. hook echem typickým pro supercelární bouře (viz radar z 15:50 UTC). V západních Čechách se mezitím formují bouře do pásu, squall line, postupujícího k východu. V termínu 16:35 až 17:00 UTC krátce chybí data. V 17 UTC zároveň dochází k výraznému útlumu radarové odrazivosti v celé oblasti v důsledku přechodu silných bouří a s nimi spojenými silnými srážkami v okolí radaru Brdy. Po 17 UTC se konvekční bouře formují a vytvářejí bow echo. Silné bouře se objevují také v severním Rakousku a postují nad jihovýchod našeho území. V 18 UTC je na radarových snímcích patrný tzv. *rear-inflow jet*, neboli vtok suchého vzduchu do bow echa od západu (viz obr. 5.7). Bouře nad naším územím jsou ve tvaru comma echo s patrnou hlavou nad severními Čechami. Nad Dolním Rakouskem se současně formuje další linie bouří, která se následně spojí s výrazným pásem bouří nad Moravou a dále postupuje východně nad západní Slovensko.



Obrázek 5.7: Bow echo vyskytující se nad naším územím 25. 6. v 18:10 UTC. Na obrázku je zobrazen produkt MAX Z 3D vytvořený z údajů naměřených radarem Brdy. Černá šipka na snímku znázorňuje tzv. *rear-inflow jet*.

Z podledu družice MSG se konvekční bouře na frontální vlně začaly formovat v brzkých ranních hodinách nad západní Evropou hlavně v oblasti Belgie a Německa. Nad naším územím se v té době vyskytují pouze mlhy v jižních Čechách a na jižní Moravě. Kolem 11:30 UTC se však bouře zorganizovaly do squall line, která postupovala z Francie přes Německo, Švýcarsko a Rakousko do České republiky. Před 12 UTC naše severní hranice minula silná bouře. Při

přechodu squall line na naše území Krušné hory podpořily konvekční činnost, jak je vidět na produktu VIS-IR. Jsou zde zřetelné přestřelující vrcholy i výtoky studeného vzduchu u jednotlivých bouří. V jižní části je patrná linearizace, v severní části se vyskytují izolované bouře - supercely. Později došlo k linearizaci také v severní části. V klasickém spektrálním kanálu IR10.8 se zobrazeným intervalem teplot od 240 do 200 K lze vidět, že horní hranice oblačnosti dosahuje velmi nízkých hodnot, zejména kolem 17:30 UTC jak v oblasti Českomoravské vrchoviny, tak později nad Rakouskem a Slovenskem. Za povšimnutí stojí také prstencové bouře nad Rakouskem. Po 19 UTC už bow echo zeslabuje, má typický tvar comma echo. Nárazy větru jsou ale podle údajů z pozemních stanic stále intenzivní, ojediněle nad 30 m.s⁻¹.

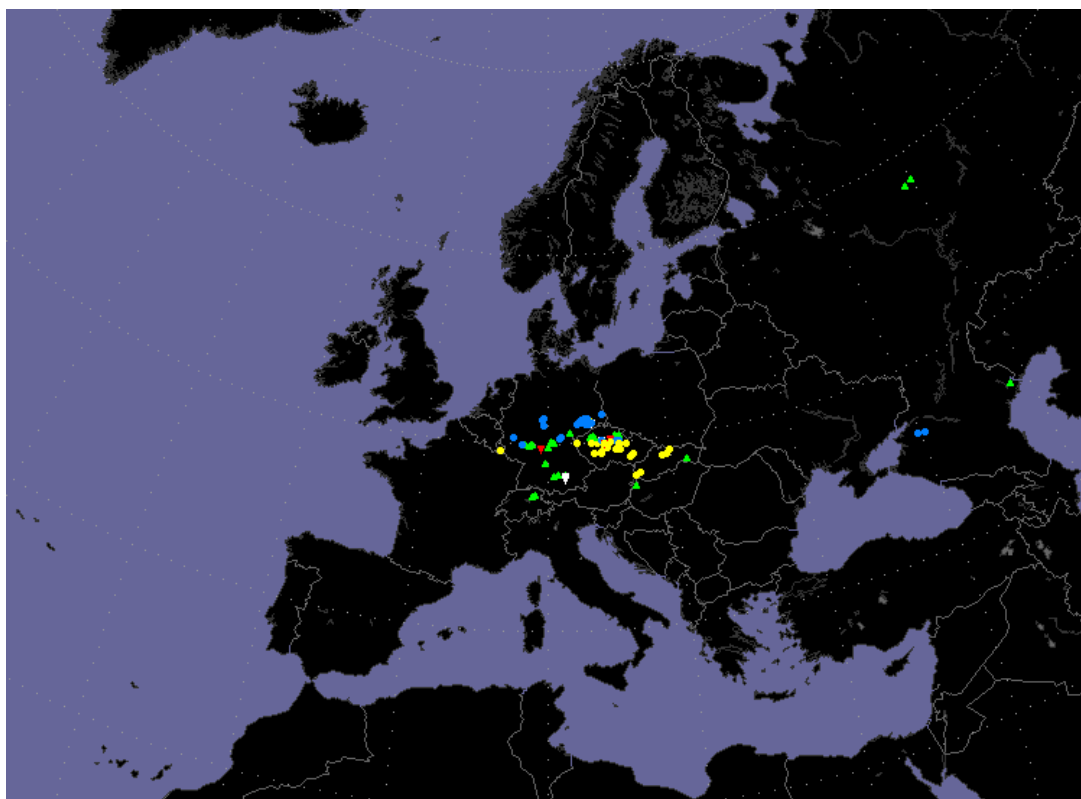
Vyhodnocení situace a shrnutí

Výrazné bouřky se vyskytovaly již kolem poledne poblíž středu nízkého tlaku vzduchu, který postupoval severně od českých hranic přes Německo. Hlavní úlohu v tomto případě však sehrála výrazná studená fronta a čára instability před ní, která v odpoledních a večerních hodinách 25. 6. 2008 přecházela přes střední Evropu, doprovázená na území České republiky a Rakouska silnými konvekčními bouřemi. K zesílení systému squall line vyskytujícího se nad naším územím došlo právě při přechodu přes „bazén“ vlhkého vzduchu ve východních Čechách. Vytvořil se zde intenzivní tlakový gradient. V tuto dobu se bouře dostaly do patrně nejničivější fáze, kdy se v dané oblasti vyskytovaly silné nárazy větru a tornáda. Později, při zkoumání naměřených hodnot nárazů větru z jednotlivých pozemních stanic, bylo zhodnoceno, že bouře, jež se 25. 6. 2008 vyskytly nad střední Evropou, splňují kritéria pro derecho.

Na studené části frontální vlny se vyskytly na našem území četné přeháňky a bouřky (95 % stanic se srážkami, 88 % stanic s bouřkou) uspořádané do souvislého poměrně rychle postupujícího pásu k východu. V bouřkách se vyskytly místy přívalové srážky, při kterých během několika desítek minut napršelo 10 až 30 mm (Anenský vrch v Orlických horách 33 mm/h). Celkové 24-hodinové úhrny srážek ojediněle překročily i 40 mm (např. Strážnice 42 mm, Strání 43 mm, Žatec 44 mm, Suchý vrch téměř 50 mm). Kroupy byly hlášeny např. z Chebu, Přimdy, Žatce, Doks, Tábora a Kostelní Myslové. Škody působil také silný vítr, jenž v bouřkách dosahoval 15 až 25 m/s, ojediněle překročil i hranici 30 m/s (např. Luká 31 m/s, Chotusice a Orlová 33 m/s, Svratouch 34 m/s a Hošťálková-Maruška na Zlínsku 36 m/s). V obci Nové Těchanovice - Zálužná (okr. Opava) se v 17:20 UTC vyskytl downburst, o kterém je podrobněji pojednáno v [35]. Sdělovacími prostředky (MF-Dnes) pak byly hlášeny případy škod, které naznačovaly možnost výskytu tornád. Škody způsobené silným větrem, srážkami a blesky však byly hlášeny z různých částí České republiky (viz obr. 5.8).

Jako jednu z nejzajímavějších oblastí zasažených silnými bouřemi lze považovat území jižně od Heřmanova Městce a Chrudimi. Následným terénním průzkumem a rozhovory s místními obyvateli bylo potvrzeno, že přinejmenším v pásu obcí Pohled - Deblou - Smrkový Týnec se téměř jistě vyskytlo tornádo. Podle způsobených škod bylo ohodnoceno stupněm F2 Fujitovy stupnice. Rozsáhlé polomy v okolí však byly pravděpodobně způsobeny mikrobursty. Kromě těchto tří lokalit byly zaznamenány identické škody (a také svědectví) např. i u obce Tasovice (ve zmiňovaném pruhu západněji od jmenovaných tří obcí). Zda se jednalo o déle žijící tornádo nebo o několik přechodnějších jevů, se neví. Podrobnější informace o tomto případě a dokumentaci způsobených škod viz [35].

Počet regionů zasažených silnými bouřemi byl vyšší, než se očekávalo, rozsah PVI nebyl



Obrázek 5.8: Výskyt nebezpečných jevů v Evropě v době od 00 UTC 25. 6. 2008 do 06 UTC 26. 6. 2008 (převzato z [23]). Na obrázku jsou znázorněny polohy všech hlášení o trombách (bílá), výskytu velkých krup (zelená), přívalových deštích (modrá), tornádech (červená) a nebezpečných nárazech větru (žlutá). V tomto termínu bylo hlášeno celkem 82 případů, z toho 32 pouze v České republice.

dostatečný. Nebyla vydána IVEJ, přestože kritéria pro její vydání byla překročena (srážky $> 70 \text{ mm}/3 \text{ h}$ ($80 \text{ mm}/6 \text{ h}$) nebo nárazy větru $> 29 \text{ m/s}$). V rámci fungování SIVS se mj. projevil problém v komunikaci mezi CPP a RPP a také dílčí problém RPP (konkrétně střídání služeb, přechod několika krajů, kde nejsou noční služby, pod jedno RPP a schopnost jednotlivých meteorologů prosadit se při rozhodování v kritických situacích). Velkou úlohu také sehrálo množství telefonních dotazů a s ním spojený stres během dne na sloužící meteorology. Neměli tak dostatek času soustředit se na aktuální situaci a zároveň provozovat rutinní záležitosti. Nefungující radar Skalky a nedostatek zkušeností meteorologů s podobnou situací zapříčinilo podcenění dané situace. Později byla PVI 24/08 vyhodnocena jako jen částečně úspěšná právě kvůli výše zmíněným okolnostem.

Některé z bouří byly doprovázeny mimořádnými průvodními jevy, jako např. silným větrem, bleskovou aktivitou nebo tornádem. Jak na základě radarových dat, tak pozorování a fotodokumentace je zřejmé, že se v severních Čechách 25. 6. 2008 vyskytovaly supercelární bouře. Podmínky byly velmi příhodné ke vzniku organizované konvekce a možných intenzivních doprovodných jevů. Vývoj v rámci proudění v nižších hladinách zřejmě hrál hlavní úlohu v přechodu mezi izolovanými bouřkami a lineárním systémem. Lokální podmínky mohly sehrát roli ve formování bow echa nad středními a východními Čechami. Postupující

bow echo splnilo kritéria pro derecho (viz část 2.3.2), bylo doprovázeno shluky downburstů a mikroburstů. Systém postupoval pod jiným úhlem, než se předpovídalo, díky „bazénu“ vlhkého vzduchu, který byl nejspíše jednou z příčin nebezpečnosti tohoto jevu. Dobrý výkon byl předveden v rámci předpovědi pole instability, stříhu větru a postupného zesilování proudění v nižších hladinách, ale slabší výkon v iniciaci konvekce a ve vývoji přízemních tlakových center. Velmi špatně si modely vedly v předpovědi postupu konvekčního systému, kdy předpokládaly postup na severozápad do Polska, ve skutečnosti tomu ale bylo jinak. Určení směru postupu pravostáčivé supercely grafickou konstrukcí v hodografu se v tomto případě ukázalo jako úspěšné.

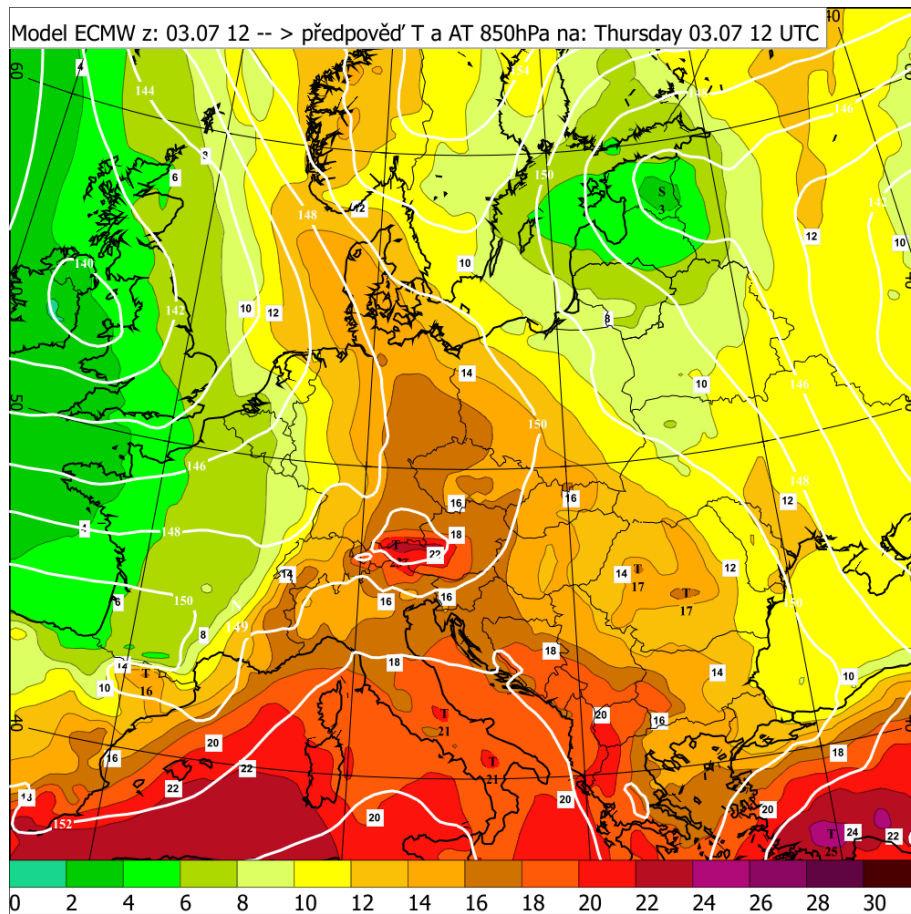
5.5 3. červenec

Začátkem července postupovala přes západní a střední Evropu k východu tlaková výše, která postupně slábla a ustupovala k severu. Na její zadní straně k nám přechodně proudil od jihu teplý vzduch. Během dne 2. 7. postupovala přes západní Evropu k východu studená fronta. Příliv teplého vzduchu od jihu vyvrcholil 3. 7. 2008, kdy v hladině AT 850 hPa teplota dosahovala v západních Čechách 16 °C (viz obr. 5.9). Potom přes naše území přešla studená fronta, která odpoledne a večer ovlivňovala počasí v České republice. Za frontou se k nám od jihozápadu rozšířil hřeben vyššího tlaku vzduchu.

Předpovědní materiály

Potřebné údaje z **modelu GFS** nám bohužel nebyly k dispozici. **Model ECMWF** spuštěný 2. 7. v 00 UTC předpovídá na dopoledne 3. 7. CAPE do 600 J/kg. Ale nad západní Evropou je na výstupech patrný pás vyšších hodnot CAPE v přibližně severojižním směru, který postupuje na východ. V 18 UTC dosahuje maxima 1083 J/kg v západních Čechách a postupně zeslabuje. Největší množství srážek očekává do 4. 7. 00 UTC ve středních Čechách do 11 mm/6 h, na Moravě maximálně 8 mm/6 h. Od 00 do 6 UTC očekává až 20 mm v severních a středních Čechách. Model spuštěný 2. 7. v 12 UTC se příliš neliší, jen nad Šumavou a v jihozápadních Čechách dosahuje CAPE 810 J/kg. Srážky do půlnoci 4. 7. maximálně 10 mm/6 h, v 6 UTC 4. 7. v severních a jižních Čechách do 24 mm/6 h, jihovýchod Moravy 12 mm/6 h. Běh modelu z 3. 7. 00 UTC už ale ukazuje poněkud vyšší hodnoty, zejména od 00 do 6 UTC v jižních Čechách (až 1349 J/kg), které se postupně rozšiřují do oblasti Čech, až v 18 UTC pokrývají téměř celé naše území s výjimkou jihovýchodu (obr. 50). Hodnoty CAPE se pohybují kolem 1000 J/kg a postupem prase času slábnou. Mezi 6 a 12 UTC 3. 7. očekává až 4 mm na jihozápadě Čech, do 18 UTC maximálně 4 mm na celém našem území. 4. 7. 00 UTC se vyšší srážkový úhrn za 6 hodin očekává na Moravě, v jihozápadních Čechách až 20 mm (obr. 51), do 6 UTC potom maxima jižních Čechách až 35 mm.

Numerický předpovědní **model ALADIN** spuštěný 3. 7. v 00 UTC nepočítá dopoledne výrazné hodnoty CAPE. Ve 14 UTC jsou maxima nad Hrubým Jeseníkem 905 J/kg, jižní Čechy 1149 J/kg. Nad Bavorskem dosahují v 18 UTC maxima 1201 J/kg, nad Českou republikou 832 J/kg na jižní Moravě (obr. 52). Ve 22 UTC se vyšší hodnoty udržují v centrální části našeho území, nepřesahují hranici 1000 J/kg. V dopoledních hodinách se neočekávají výrazné srážky, model udává maximální hodnoty nad Šumavou a Beskydami kolem 4 mm/6 h. V odpoledních hodinách se už ale situace mění. Do 18 UTC se očekávají srážky na většině

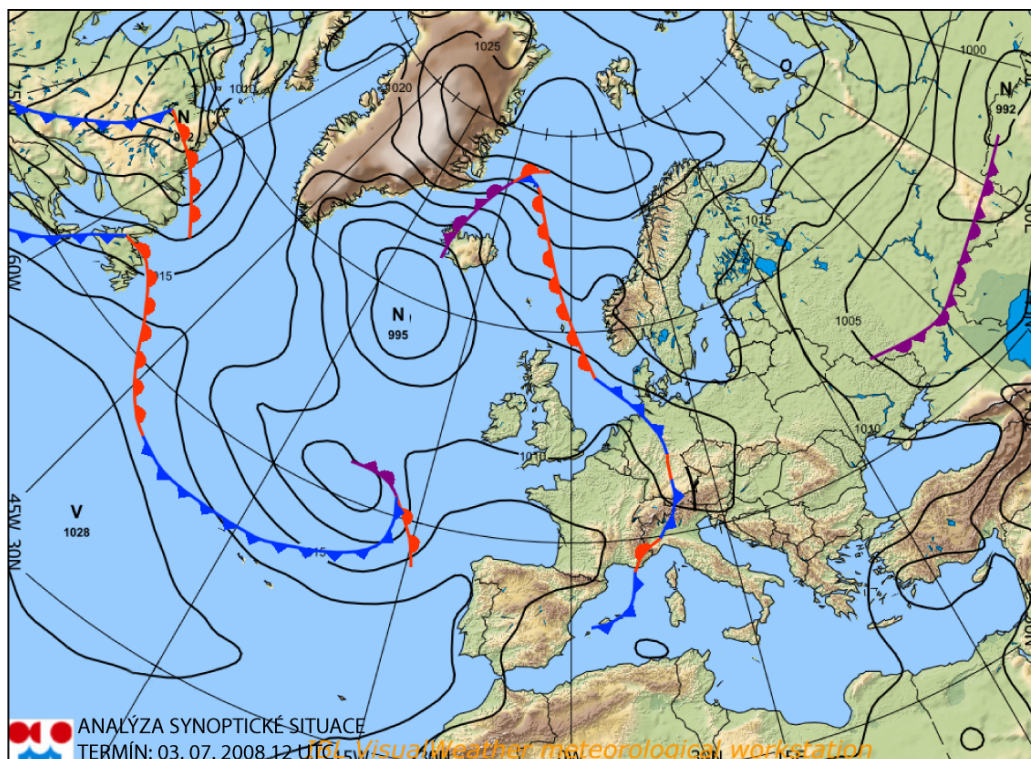


Obrázek 5.9: Teplota a AT 850 hPa z 3. července 2008 12 UTC, model ECMWF

území, maxima v Hrubém Jeseníku 15 mm/6 h a v jihozápadních Čechách a západně od našich hranic až 41,6 mm/6 h. Mezi 18 a 00 UTC 4. 7. model počítá srážky téměř v celé České republice, maxima v oblasti Ostravy dosahují 19,3 mm, jižní Čechy 15,7 mm (obr. 53).

Na **aerologickém výstupu** z Prahy-Libuše 3. 7. v 00 UTC je patrná přízemní inverze, při které CIN dosahuje 286 J/kg. Ve 12 UTC se vyskytuje při zemi relativně suchý vzduch, teplota konvekce je 27 °C a hodnota *FI* 3,2 poukazuje na labilitu v atmosféře (viz obr. 46). CAPE byla podle [32] velmi vysoká: 1209 J/kg, počítaná podle virtuální teploty až 1319 J/kg. V 18 UTC už *FI* dosahuje hodnoty 6,6, teplota konvekce 29,4 °C a při zemi výrazná inverze teploty. Hodnota CIN tedy 224 J/kg. 4. 7. v 00 UTC už je vzduch vlhčí, *FI* záporný a CAPE 102 J/kg. Ze stanice Prostějov 3. 7. v 00 UTC byl naměřen také relativně suchý vzduch a při zemi výrazná inverze teploty. Ve 12 UTC stále suchý vzduch, teplota konvekce 28,4 °C, hodnota *FI* -5,6. CAPE 217 J/kg (pomocí virtuální teploty spočteno 309 J/kg). Na půlnočním výstupu z 4. 7. je zřejmé výrazné zvlhčení vzduchu v celé měřené vrstvě, teplota konvekce 25 °C a *FI* 1,3. Hodnota CAPE 187 J/kg (213 J/kg), CIN 64 J/kg (66 J/kg).

Hodograf větru z Prahy-Libuše má po celý den charakter poněkud chaotický a hodnoty SREH se pohybují mírně nad nulou. Střih větru má maximum v 6 UTC, a to $4,68 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Tvar hodografu z Prostějova má také chaotický tvar, ale střih větru dosahuje až $5,56 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



Obrázek 5.10: Analýza synoptické situace z 3. července 2008 12 UTC

(obr. 47). SREH má v 00 UTC $42 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Ve Vídni byl hodograf v 00 UTC podobný výše zmiňovaným, jen ve 12 UTC byl hodograf větru přímější, jeho délku odhadujeme na $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a SREH byla vyčíslena na $54 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Předpovědní služba ČHMÚ a SIVS

Dne 2. 7. v 10:36 SELČ byla pro celé území České republiky vydána výstražná informace PVI 28/08 na bouřky s nebezpečnými doprovodnými jevy (a vysoké teploty) s platností od 3. 7. 14:00 do 4. 7. 8:00 SELČ. V oblasti postupující studené fronty byly očekávány četné bouřky a přeháňky. Ojedinelé se předpokládal výskyt silných bouřek s krupobitím a úhrny srážek kolem 50 mm. Při bouřkách zesílení větru s nárazy 15 až $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ojedinelé až $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Následující den 3. 7. v 15:01 SELČ byla vydána upřesňující PVI 29/08 extrémního stupně nebezpeční na silné bouřky s velmi nebezpečnými doprovodnými jevy s platností od 3. 7. 15:00 do 4. 7. 8:00 SELČ pro celou část našeho území s výjimkou Královéhradeckého, Pardubického, Zlínského, Olomouckého a Moravskoslezského kraje, pro které platila výstraha až od 3. 7. 20:00 do 4. 7. 15:00 SELČ. Očekávané úhrny srážek se zvýšily až na 80 mm především na Vysočině a v severovýchodní polovině České republiky.

Vývoj situace z pohledu metod dálkové detekce

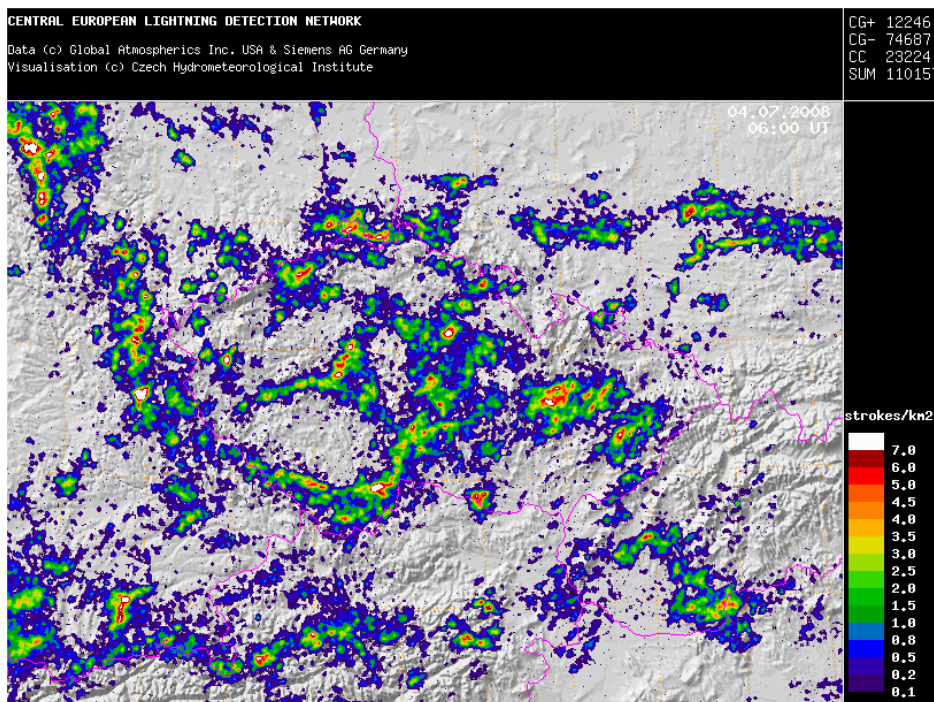
První bouře na našem území se začaly vyskytovat po 8 UTC nad Šumavou a velmi zvolna postupovaly k severovýchodu. Přibližně v 11 UTC se tvořily bouřkové oblaky i v oblasti Novohradských hor a na Plzeňsku. Kolem 14 UTC už bouře zasahovaly většinu území Čech (výrazný multiceleární systém), na Znojemsku a na severovýchod od Orlických hor a Hrubého Jeseníku. Tyto bouře charakterizovala vysoká radiolokační odrazivost a výrazná elektrická aktivita. Bouře na Znojemsku se pohybovala k severozápadu a postupem času slábla. Odpoledne se bouře vyskytovaly převážně v Čechách a postupovaly na severovýchod. Před 19 UTC začala velmi vysokou radiolokační odrazivost po relativně dlouhou dobu (asi hodinu) vykazovat bouře v oblasti Jindřichova Hradce. Neodchylovala se však od převažujícího směru postupu okolních bouří a nevykazovala na radaru jiné charakteristiky, které by mohly poukazovat na supercelární bouři. Kolem 19 UTC k nám od jihozápadu postupoval konvekční systém z Německa a Rakouska, který v průběhu noci přešel přes jižní Čechy, Vysočinu a Moravu na severovýchod.

Nad západní Evropou se z pohledu družice MSG udržovala studená fronta s bouřkami, která zvolna postupovala k východu. Už před 10 UTC se nad Šumavou tvoří předfrontální bouře s nízkými teplotami horní hranice oblačnosti, které postupují k severovýchodu. Po 12 UTC je na produktu VIS-IR patrný výtok studeného vzduchu z této bouře. Později se tvoří také ve středních Čechách a od západu postupují silné bouře z Německa nad naše území, které při přechodu pohraničních hor slábnou. Po 13:30 UTC se bouře objevuje také nad jižní Moravou. Kolem 19 UTC postupují bouře od jihozápadu. Bouře na jindřichohradecku vykazují studený prstenec, na ostatních bouřích není tento útvar patrný, což ale může být způsobeno dlouhým intervalem snímání družice. Po 21 UTC už se bouře vyskytují v celé centrální části České republiky a postupují na Moravu a dále k severovýchodu. Během noci pokrývá celou oblast našeho území vertikálně mohutná oblačnost.

Vyhodnocení situace a shrnutí

Již před studenou frontou se v Čechách v teplém vzduchu v dopoledních hodinách (na čáře instability) tvořily bouřky. Další bouřky se vyskytly odpoledne na postupující studené frontě k východu (100 % stanic se srážkami, 85 % stanic s bouřkou). Bouře, které se tohoto dne vyskytly, byly mimořádné díky intenzivní elektrické aktivitě. 3. 7. bylo nad Českou republikou a v jejím nejbližším okolí detekcí blesků zaznamenáno přes 110 tisíc výbojů, přičemž maximální dosažená intenzita v oblasti 1×1 km dosahovala 23 blesků za den (viz obr. 5.11). Místy se vyskytly bouřky s přívalovými srážkami s úhrny kolem 50 mm. Nejvyšší srážkový úhrn byl naměřen v Jevíčku (67 mm), kroupy byly zaznamenány na Sedlčansku, v Úpici a v Počátkách. Nárazy větru jen ojediněle překročily 20 m.s^{-1} (maximum v Holešově 24 m.s^{-1}).

Model ECMWF prostorově celkem dobře popisuje instabilní prostředí, odhady srážkových úhrnů také celkem dobře korespondovaly se skutečností. Výjimkou však byly srážkové úhrny nad východními Čechami a Vysočinou, kde se průměrná hodnota srážkových úhrnů 4. 7. 00 UTC odhadnutá kombinací radarů a srážkoměrů pohybovala kolem 20 mm/6 h. ALADIN v dopoledních hodinách velmi dobře vystihl situaci, avšak ve večerních hodinách se bouře vyskytly na Moravě více na východ, než model očekával. Do 18 UTC byly výraznější srážkové úhrny naměřeny spíše v západní polovině České republiky, v Hrubém Jeseníku v bouřce spadly maximálně 4 mm srážek. Velmi dobře však předpověděl srážkový úhrn nad Německem. Mezi



Obrázek 5.11: Hustota blesků za 24 hodin od 3. 7. 06 UTC do 4. 7. 06 UTC.

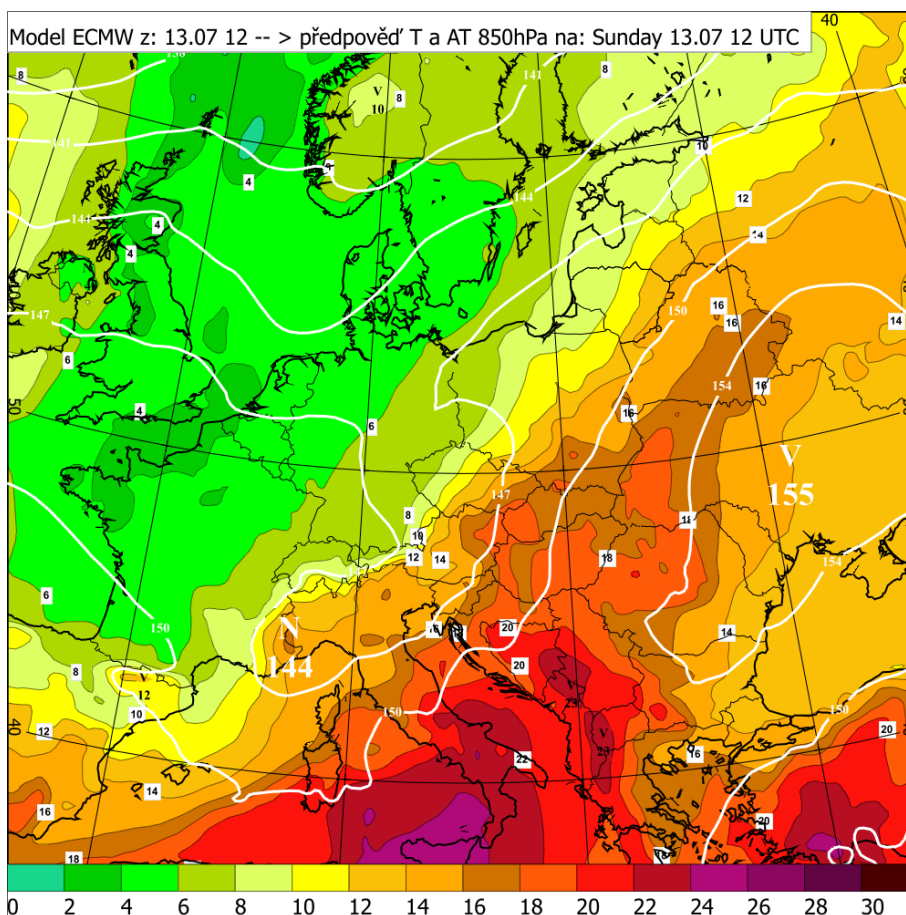
18 a 00 UTC následujícího dne se největší srážkové úhrny vyskytly v oblasti od jižních Čech přes východní Čechy a Vysočinu až k Olomouci, kde bylo naměřeno až 59 mm/6 h.

Výstražná informace PVI 28/08 byla částečně úspěšná, srážkové úhrny kolem 50 mm se totiž vyskytly místy, nikoliv ojediněle. Výstražná informace PVI 29/08 byla vyhodnocena také jako částečně úspěšná. Nebezpečné jevy spíše splňovaly pouze vysoký stupeň, nikoliv extrémní stupeň nebezpečí. Navíc by doba platnosti výstrahy stačila do 3:00, nikoli do 15:00 SELČ, kdy bylo splněno kritérium jen pro silný déšť.

5.6 13. červenec

Dne 10. 7. postupovala tlaková níže přes Britské ostrovy k severovýchodu, přes naše území přecházela teplá fronta, za kterou se k nám od jihozápadu rozšířil výběžek vyššího tlaku vzduchu. Teploty v hladině AT 850 hPa se pohybovaly kolem 10 °C. V hladině AT 500 hPa se Česká republika nacházela na přední části tlakové níže nad Severním mořem, která se postupně vyplňovala. Studená fronta související se zmíněnou tlakovou níží postupovala 11. 7. přes střední Evropu k východu, před ní na naše území zesiloval příliv teplého vzduchu od jihozápadu a teploty v hladině AT 850 hPa dosahovaly v průměru 16 °C. V souvislosti s prohlubováním brázdy nižšího tlaku vzduchu nad západní Evropou se postup této studené fronty nad naším územím zpomalil, fronta se vlnila a frontální vlny s ní související ovlivňovaly během dalších dvou dnů počasí na území České republiky. 12. 7. odpoledne a večer se toto zvládnuté frontální rozhraní udržovalo nad naším územím téměř bez pohybu. Nad Českou republikou v hladině AT 850 hPa se zvýraznil teplotní gradient. 13. 7. na západě byly teploty pod 8 °C,

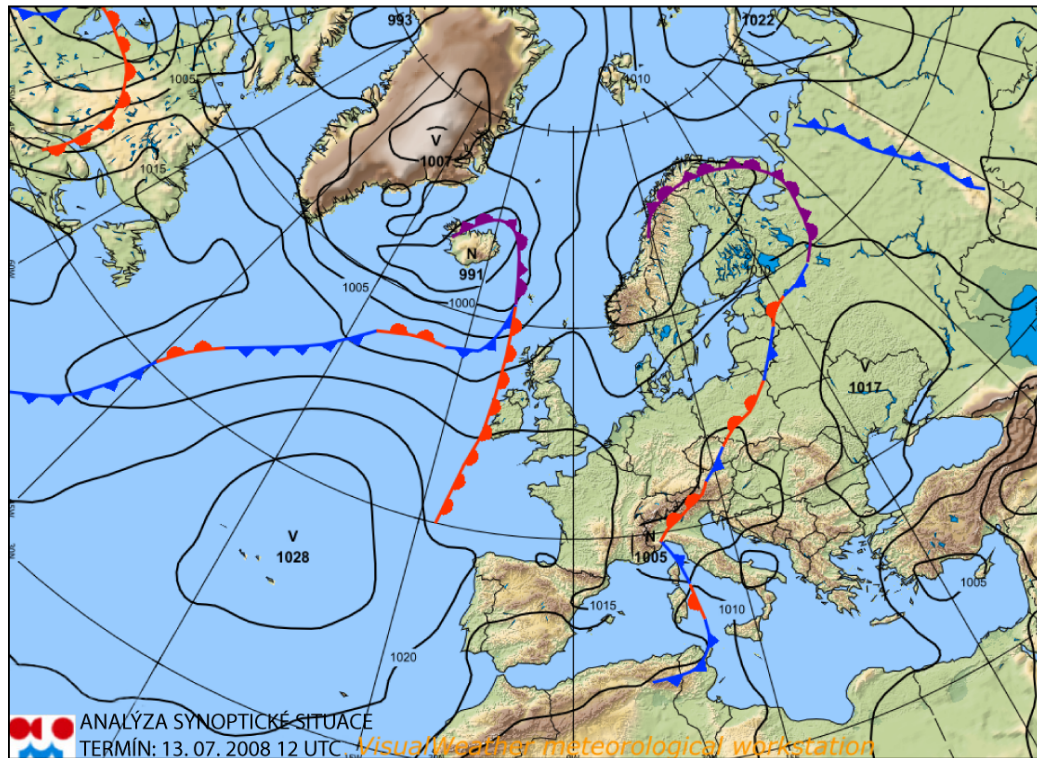
na jihovýchodě až 18 °C (viz obr. 5.12). V noci na 14. 7. se po jeho přechodu od západu na naše území rozšířil výběžek vyššího tlaku vzduchu.



Obrázek 5.12: Teplota a AT 850 hPa z 13. července 2008 12 UTC, model ECMWF

Předpovědní materiály

Model GFS spuštěný 12. 7. 00 UTC spočítal vysoké CAPE na východě našeho území v odpoledních hodinách s maximem v 15 UTC v oblasti Uherského hradiště do 1500 J/kg, hodnota LI -6 °C. Tento pás vysokých hodnot postupem času slábne. Srážky očekává na západě našeho území spíše nekonvekčního charakteru, ve východní Moravě konvekční srážky do 2 mm/3 h. Největší srážkové úhrny potom předpovídá mezi 12 a 15 UTC pro východní Čechy do 9 mm/3 h, do 18 UTC v oblasti Orlických hor do 7 mm/3 h. Běh modelu GFS z 13. 7. 00 UTC počítá s hodnotami CAPE v 12 UTC ve střední části České republiky do 1200 J/kg, LI do -5 °C. V 15 UTC nad Moravou LI -2 °C (obr. 60), v 18 UTC na severovýchodě pouze -1 °C. Hodnoty CAPE do 1300 J/kg se v průběhu noci zeslabují. Srážky model předpovídá v dopoledních hodinách na západě našeho území z konvekční oblačnosti (obr. 61), které se během dne přesouvají k západu. Maxima do 15 mm/3 h v Krušných horách, na Moravě do 10 mm/3 h.



Obrázek 5.13: Analýza synoptické situace z 13. července 2008 12 UTC

Model ECMWF spuštěný 13. 7. 00 UTC očekává vysoké hodnoty CAPE v 9 UTC v pásu ležícím přes Bělorusko, Ukrajinu k jihovýchodnímu Polsku, nad západním Slovenskem a východní Moravou jsou CAPE podstatně nižší do 1000 J/kg. Ve 12 UTC ale na jižní Moravě předpovídá maximum 1275 J/kg, v 15 UTC až 1893 J/kg (obr. 62). Poté už se CAPE nad naším územím snižuje. Model z 12 UTC už vysoké hodnoty CAPE do 18 UTC dává na celou Moravu, pohybují se kolem 2000 J/kg. Srážky se podle modelu ECMWF z 12. 7. 00 UTC v dopoledních hodinách očekávají téměř na celém území České republiky s maximem nad středními Čechami do 14 mm/6 h. Mezi 12 a 18 UTC by měly největší úhrny srážek spadnout na Moravě, a to do 20 mm/6 h. Model z 13. 7. 00 UTC očekává maximální srážkový úhrn 26 mm nad Moravou mezi 12 a 18 UTC (obr. 63).

Model ALADIN spuštěný v 13. 7. v 00 UTC počítá na 12 UTC vysoké hodnoty CAPE pro severovýchod našeho území do 1000 J/kg, v jižních Čechách do 650 J/kg. Ve 14 UTC se pás vysokých hodnot vyskytuje od jižních po severovýchodní Čechy, na Moravě maxima nad Beskydami 1326 J/kg. Postupem času se tyto hodnoty ještě více zvýrazňují (obr. 64) a v 18 UTC zasahují střední a východní část našeho území s maximální CAPE 1161 J/kg na jižní Moravě. V následujících termínech se CAPE snižuje. Srážkami model na tento den nešetřil. Mezi 12 a 18 UTC očekával, že v jižních Čechách spadne 28,2 mm, v oblasti Jeseníku 24,5 mm, severně od Krkonoš až 30,1 mm. Do 14. 7. 00 UTC očekává ALADIN ještě o něco větší srážkové úhrny, zejména v severovýchodní části našeho území. Na Kolínsku až 52 mm/6 h, Orlické hory a Jeseník také nad 50 mm/6 h, maxima se však vyskytují nad Polskem, a to 74,8 mm/6 h (viz obr. 65).

Aerologický výstup z půlnoci 13. 7. ze stanice Praha-Libuš ukazuje přízemní izotermii, teplota konvekce 19,1 °C a FI -5,9. V 6 UTC se vzduch výrazně zvlhčil, teplota konvekce klesla k 13,6 °C. CAPE a CIN blízké nule. Situace ve 12 UTC se příliš nemění (obr. 56), v 18 UTC je vrstvička suchého vzduchu při zemi, teplota konvekce 14,7 °C a FI -8,9. Noční výstupy jsou podobné. Na výstupu z Prostějova 13. 7. v 00 UTC dosahuje teplota konvekce 20,1 °C, FI -0,1 a CIN 198 J/kg (178 J/kg počítaný pomocí virtuální teploty). V 12 UTC se vyskytuje teplotní inverze ve výšce asi 1 km, ale teplota konvekce dosahuje 31,9 °C, FI 2,7 a CAPE až 1296 J/kg (1397 J/kg podle virtuální teploty). Všechny tyto hodnoty poukazují na labilitu atmosféry a na značné množství nahromaděné energie. 14. 7. 00 UTC už je FI záporný, teplota konvekce 28,7 °C a vrstva relativně suchého vzduchu v 5 km.

Hodograf sestavený z aerologické sondáže z Prahy-Libuše v 00 UTC má spíše přímočarý charakter, hodnota SREH má jen 14 m².s⁻², ale v dalších měřeních je tvar hodografu odlišný. Má pravostáčivý charakter a helicity dosahuje ve 12 UTC až k 349 m².s⁻² (obr. 57). Ve všech případech přesahuje stříh větru 5.10⁻³ s⁻¹ a jeho délka se pohybuje odhadem od 40 do 60 m.s⁻¹. Prostějov má tvar přímý až chaotický, stříh větru ve 12 UTC byl 7,71.10⁻³ s⁻¹. Ze stanice Vídeň mají hodografy v tomto termínu spíše chaotický tvar. V 00 UTC byly vypočteny hodnoty 217 m².s⁻² a 6,05.10⁻³ s⁻¹, ve 12 UTC 130 m².s⁻² a 8,49.10⁻³ s⁻¹.

Předpovědní služba ČHMÚ a SIVS

Výstražná informace PVI 31/08 vydaná 11. 7. 10:38 SELČ upozorňuje na výskyt bouřek s nebezpečnými jevy v době od 11. 7. 18:00 do 12. 7. 6:00 SELČ pro Prahu, Středočeský, Karlovarský, Plzeňský, Jihočeský, Liberecký a Ústecký kraj a od 12. 7. 12:00 do 13. 7. 22:00 SELČ pro kraj Jihočeský, Pardubický, Královéhradecký, Vysočinu a celé území Moravy a Slezska, celkem tedy osm krajů. V oblasti postupující studené fronty se očekávaly četné bouřky a přehánky, ojediněle silné bouřky s krupobitím a úhrny srážek kolem 40 mm. Při bouřkách se předpokládalo zesilování větru s nárazy 20 až 25 m.s⁻¹. Na jednotlivých frontálních vlnách se očekával silný déšť ojediněle s úhrny kolem 30 mm za 6 hodin. V důsledku přívalových srážek se místy předpokládalo rozkolísání hladin menších vodních toků i s ojedinělou možností dosažení 1. stupně povodňové aktivity. 12. 7. v 10:31 SELČ je vydána PVI 32/08, která mění dobu platnosti předchozí PVI na časové období od 12. 7. 15:00 do 13. 7. 23:00 SELČ pro stejné kraje jako v předchozím případě, s výjimkou kraje Jihočeského. Intenzivnější bouřky doprovázené silným větrem, kroupami a přívalovými srážkami se očekávaly podle nové PVI ve východní polovině území, zejména v noci z 12. 7. na 13. 7. a během dne 13. 7. Na jednotlivých frontálních vlnách se očekával i vydatný déšť, hlavně v Čechách, ojediněle s úhrny kolem 30 mm za 12 hodin. Doznívající intenzivnější srážky se měly na východě Moravy a Slezska vyskytovat ještě v noci z 13. 7. na 14. 7., s ojedinělou možností dosažení 1. stupně povodňové aktivity.

Vývoj situace z pohledu metod dálkové detekce

Už v noci z 12. 7. na 13. 7. se vyskytovalo několik bouří v Beskydech, v Čechách ale byly srážky z oblačnosti vrstevnatého charakteru. Kolem 8 UTC se bouřky objevily v Krkonoších, ale postupovaly s pásmem vrstevnaté oblačnosti dále na severovýchod. První výraznější bouře se v dosahu našich radarů začaly vyskytovat po 11 UTC na jihozápadním Slovensku a po-

stupovaly dále na sever, bouře se začaly objevovat také na východě Moravy. Kolem 14 UTC se od Valašského Meziříčí až po Ostravu vytvořil pás oblačnosti, který postupoval na sever. V souvislosti se zvlněnou studenou frontou se začaly přibližně v 15 UTC bouře tvořit také ve východní části Čech a střední Moravy. V 16 UTC se nad Moravou vytvořil pás bouří sahající od Svitav přes Olomoucko až k Břeclavi a dále postupoval k severovýchodu. Silné bouřky zasáhly celou oblast Moravy, na bočních průmětech výrazně přesahovaly výšku 15 km. Po 21 UTC už se fronta nacházela mimo naše území.

Na produktu IR-BT z družice MSG je patrná oblačnost studené fronty, která zvolna postupuje k severovýchodu nad naším územím. Prstencové bouře se začínají vyvíjet po 12 UTC nad Slovenskem a kolem 13 UTC ve východním okraji Beskyd. Nad naším územím začíná konvekční oblačnost narůstat do větších výšek až po 15 UTC na severovýchodě našeho území. Na produktu VIS-IR jsou zřetelné přestřelující vrcholy, které na některých místech „prorůstají“ vrstevnatější oblačnost. V 17 UTC se pás kováldin nad Moravou propojil a postupoval na severovýchod za hranice našeho území. Na produktu Storm mají žlutou barvu, značící potenciální nebezpečnost, bouře nad Slovenskem a Beskydami.

Vyhodnocení situace a shrnutí

V České republice panovalo rozdílné počasí v Čechách a na Moravě a ve Slezku. Nejintenzivnější srážky se vyskytly v oblasti zvlněné studené fronty 13. 7. 2008 na východě našeho území (100 % stanic se srážkami, 51 % stanic s bouřkou). Na severovýchodě České republiky se vyskytly vysoké srážkové úhrny (Bohumín 41 mm).

Model GFS předpovídal v dopoledních hodinách nad naším územím srážky z konvekční oblačnosti, nad západními Čechami ale postupovala vrstevnatá oblačnost. V západních Čechách se srážkové úhrny pohybovaly kolem 7 mm/6 h. Odpolední srážky výrazně podhodnotil (je ale třeba brát ohled na rozlišovací schopnost modelu GFS). Model ECMWF dobře vystihl labilitu atmosféry na Moravě i srážkové úhrny, jen podcenil bouřky na severovýchodní Moravě, kde se naměřilo mezi 18 UTC a 00 UTC 14. 7. přes 25 mm. Ani jeden s těchto dvou modelů nepředpovídal vysoké srážkové úhrny na severovýchodní Moravě. Model ALADIN správně předpověděl místa vhodná pro výskyt bouří. V odpoledních hodinách také velmi dobře předpověděl místa a hodnoty jednotlivých srážkových úhrnů s výjimkou jižních Čech. Předpověď pro srážky naměřené do 00 UTC 4. 7. však byla výrazně neúspěšná.

Výstražná informace PVI 31/08 byla částečně úspěšná. V první části platnosti PVI (11. 7. 18:00 - 12. 7. 6:00 SELČ) se totiž silné bouřky vyskytly i v Pardubickém a Hradeckém kraji a na Vysočině. Silný déšť s úhrny kolem 30 mm se vyskytl jen místy v Libereckém kraji, podle radaru částečně i na severu Středočeského a na východě Plzeňského kraje.

Kapitola 6

Vyhodnocení „bouřkové sezóny“

V této kapitole budeme používat pojem bouřková sezóna pro období od 1. 4. do 30. 9. z toho důvodu, že pro tuto dobu se již dlouhodobě vyhodnocuje úspěšnost předpovědi bouřek v ČHMÚ. Bouřky se na našem území vyskytují i v chladné polovině roku (říjen až březen), ale jsou podstatně méně časté a jejich intenzita je málokdy nebezpečná. V roce 2008 se první významnější bouřky objevily 11. dubna, kdy se lokálně vyskytly až nečekaně vysoké úhrny. Celkově můžeme říct, že letní polovina roku 2008 byla na bouřky poměrně bohatá, zejména v červnu a červenci.

6.1 Vyhodnocení předpovědí ČHMÚ

Předpovědi počasí se v ČHMÚ hodnotí a zaznamenávají do interního dokumentu Oddělení meteorologických předpovědí (OMP). Hodnocení plošného výskytu bouřek podle platné metodiky OMP je rozděleno do čtyř kategorií, viz tabulka 6.1.

Kód	Charakteristika	Plošný výskyt bouřek
4	bouřky	více než na 70 % stanic
3	místy bouřky	30 až 69 % stanic
2	ojediněle bouřky	5 až 29 % stanic
1	bez bouřek	0 až 4 % stanic

Tabulka 6.1: Hodnocení plošného výskytu bouřek podle platné metodiky OMP

Pro období od 1. 4. do 30. 9. 2008 jsme jednotlivé předpovědi plošného výskytu bouřek (elektrické, optické a akustické jevy pozorované na pozemních stanicích) porovnali se skutečným procentuálním výskytem bouřek pro konkrétní dny uvedeném ve zprávě SYCZ31 a přiřadili jim příslušný kód podle tabulky 6.1. Získaná data jsou uvedena v tabulce na obr. 6.1. Je zřejmé, že celková úspěšnost předpovědi plošného výskytu bouřek byla poměrně vysoká. Ve 23 případech byly bouřky očekávány ojediněle, ale vyskytly se pouze na méně než 5 % stanic. Případ, kdy se očekávaly bouřky místy a ve skutečnosti se vyskytly na 88 % stanic, byl právě dne 25. 6. 2008.

předpověď	skutečnost			
	1	2	3	4
1	95	9	2	0
2	23	20	5	0
3	2	7	18	1
4	0	0	0	1

Obrázek 6.1: Úspěšnost hodnocení plošného výskytu bouřek pro období 1. 4. až 30. 9. 2008, zdroj ČHMÚ. Jednotlivé řádky představují kód předpovědi, ve sloupcích je pak kód pro skutečný výskyt bouřek. Čísla v tabulce představují počet konkrétních případů.

6.2 Vyhodnocení systému SIVS

Výstražná služba je při mimořádných a nebezpečných událostech patrně nejobtížnější částí práce v meteorologické předpovědní službě jak z hlediska odborného, tak náročnosti na psychiku. Zodpovědnost meteorologů je značná. Na jedné straně je žádoucí, aby upozornění a výstrahy na nebezpečné povětrnostní jevy nebyly zanedbány, obsahovaly co nejpřesnější informace o předpokládaném průběhu počasí a byly vydávány včas. Na straně druhé je ale potřeba vyvarovat se planých poplachů. Z pohledu fungování Integrovaného záchranného systému tvoří produkty ČHMÚ na úseku předpovědní a výstražné služby jednu z nejdůležitějších součástí.

V rámci provozu SIVS jsou v ČHMÚ podle dostupných údajů o počasí denně vyhodnocovány výstražné informace a následně zařazeny do těchto kategorií: *a* v případě, kdy nebyla vydána výstraha a nevyskytl se nebezpečný jev, *b* tehdy, když byla vydána výstraha a nevyskytl se nebezpečný jev, *c*, kdy byla vydána výstraha a vyskytl se nebezpečný jev a *d* v případě, kdy nebyla vydána výstraha a vyskytl se nebezpečný jev. Toto hodnocení je poté archivováno jako bulletin. Přehledněji jsou jednotlivé kategorie znázorněny v tabulce 6.2.

Kategorie	Výstraha	Výskyt
<i>a</i>	-	-
<i>b</i>	+	-
<i>c</i>	+	+
<i>d</i>	-	+

Tabulka 6.2: Jednotlivé kategorie používané pro vyhodnocování výstražných informací. Znaménko + je pro případ, kdy byla vydána výstražná informace, příp. se vyskytl nebezpečný jev. V opačném případě je uvedeno znaménko -.

V našem případě jsme hodnotili pouze bouřkovou sezónu, tedy letní polovinu roku v období od 1. 4. - 30. 9. 2008. Úspěšnost předpovědi jsme vyjádřili poměrem splněných předpovědí k celkovému počtu vydaných předpovědí. Úspěšnost předpovědi dne bez nebezpečných povětrnostních jevů p_1 jsme tedy určili pomocí vztahu

$$p_1 = \frac{a}{a + d} = 98,6\%, \quad (6.1)$$

úspěšnost předpovědi dne s nebezpečnými jevy p_2

$$p_2 = \frac{c}{b+c} = 74,4\%. \quad (6.2)$$

Celková úspěšnost vydávání výstrah p pro letní polovinu roku 2008 jsme potom spočítali vzorcem

$$p = \frac{a+c}{a+b+c+d} = 93,4\%. \quad (6.3)$$

Můžeme tedy říci, že úspěšnost vydávání výstrah je poměrně vysoká. Je třeba ale vzít na vědomí, že případů a je v porovnání s ostatními mnohem více ($a = 140$, $b = 10$, $c = 29$ a $d = 2$, dva případy nebyly v archivu nalezeny), což mělo určitý vliv na spočítanou úspěšnost.

V bouřkové sezóně roku 2008 bylo na bouřky s nebezpečnými jevy vydáno celkem 20 PVI, z toho jedna byla extrémního stupně nebezpečí a dvě byly v následujícím čase s okamžitou platností zrušeny. Nejvíce PVI (18) bylo vydáno pro kraj Olomoucký a Vysočina, nejméně (12) pro Karlovarský, Plzeňský a Ústecký kraj. Když ale nepočítáme výstrahy, které byly zrušeny nebo které měly pouze upřesňující charakter, počet PVI pro jednotlivé kraje je vyrovnaný a pohybuje se mezi 10 až 13 vydanými PVI za bouřkovou sezónu. Většina PVI byla hodnocena pouze jako částečně úspěšná (konkrétněji viz kapitola 5).

6.3 Zlepšení předpovědi konvekčních bouří...?

V každém okamžiku je a bude vždy co zlepšovat, nezávisle na technologickém pokroku či oboru našeho zkoumání. Nechceme tady ale v žádném případě vyvozovat závěry nebo kritizovat činnost výstražné služby ČHMÚ, která koná svou práci jak nejlépe je v jejích možnostech. „Po bitvě je každý generálem“, proto jsme chtěli pouze nastínit, jakým směrem by se mohl ubírat další vývoj předpovědních metod a předpovídání vzniku a následného postupu konvekčních bouří v meteorologické praxi.

Možností, jak zlepšit předpovědi bouřek v budoucnu, je několik. K celkovému zlepšení předpovědi výskytu nebezpečných konvekčních bouří by mohlo přispět nejen zkvalitňování modelů, zvětšování jejich rozlišovací schopnosti či dokonalejší parametrizace. Mocným nástrojem v meteorologické praxi by se měly stát indexy instability měřené pomocí družic (angl. *Global Instability Indices*, GII) [26]. Poskytují daleko lepší pokrytí zemské atmosféry a menší časové intervaly mezi jednotlivými měřeními oproti výstupům z aerologických stanic. Na škodu by nebylo také operativní využívání předpovědních map, které by v sobě najednou zahrnovaly nejdůležitější veličiny pro předpověď bouří (viz např. mapy používané v rámci projektu ESTOFEX [24]). Meteorolog by tak rychleji získal přehled o očekávané situaci a ušetřil by čas pro studium dalších dostupných informací. Využívat nejnovějších poznatků a výsledků modelování konvekčních bouří samozřejmě nelze bez neustálého vzdělávání meteorologů v tomto úzce zaměřeném a rychle se rozvíjejícím oboru.

Jako jeden z největších nedostatků se nám jeví skutečnost, že meteorolog ve službě nemá přehled o tom, co se v dané oblasti skutečně právě děje. Chybí jakási zpětná vazba ať už od HZS nebo od pozorovatelů v terénu. Možná by byla užitečná nějaká forma výměny dat, např. databáze tísňových volání, co nejaktuálnější informace o následcích význačného počasí nebo komunikace s tzv. *stormchasery* (Amateur Stormchasing Society, Skywarn apod.). Dalším užitečným zdrojem aktuálních informací by se mohla stát v dnešní době stále se rozšiřující

síť webových kamer, sledující oblohu. A přestože vždy budeme o krok za bouřkou, důležitá je komunikace s kraji a hasiči i po výskytu nebezpečného jevu (bezpečnost záchranných akcí, zabezpečení pomoci pro postižené oblasti apod.). Překážkou v soustředění se na danou situaci, získávání aktuálních informací a sledování vývoje meteorologické situace je meteorologům velký tlak v krizových situacích ze strany médií i jednotlivých občanů v podobě velkého množství telefonátů. V rámci možností by bylo přínosné při výskytu význačnějších povětrnostních jevů posílit směny meteorologů buď na CPP nebo RPP.

Z hlediska SIVS je vydávání výstrah pro jednotlivé kraje praktické pro fungování IZS, ale nešikovné pro určení konkrétní oblasti, kde hrozí výskyt nebezpečného jevu. Přestože se nebezpečný jev očekává jen na malém území určitého kraje, je barevně označen celý kraj. Určité zlepšení by proto jistě přinesla tvorba mapek s očekávaným výskytem nebezpečných jevů nezávisle na administrativním členění našeho státu, nejlépe s využitím pravděpodobnostních hodnot jejich výskytu. Svazující pro meteorology jsou také pevně dané meze pro vydávání výstrah určitého stupně na jednotlivé nebezpečné jevy.

V souvislosti s předchozími zkušenostmi jsou v průběhu letní sezóny 2009 plánované změny v SIVS, zaměřené mj. také na flexibilitu a pružnost výstražné služby. Meteorologům se nově otevírá možnost označit podle stupně nebezpečí jednotlivé okresy či výšková pásma v případě územních jevů a konkrétně lokalizovat místa s předpokládanými nebezpečnými jevy (vítr, srážky). Dochází k harmonizaci kritérií pro jednotlivé stupně nebezpečí mezi státy Evropy, budou doplněny chybějící stupně nebezpečí u všech nebezpečných jevů. IVEJ se změní na Informaci o výskytu nebezpečných jevů IVNJ a vydá se v případě, kdy se vyskytne nebezpečný jev jak s extrémním, tak i s vysokým stupněm nebezpečí. Nově se také bude vydávat předpověď na dva dny dopředu a pravidelný výhled na následující čtyři dny pomocí přehledné tabulky určené pouze určitým uživatelům (hasiči apod.). Lze očekávat, že s těmito změnami celkově naroste počet vydávaných PVI a IVNJ.

Závěr

V této práci byla věnována pozornost především konvekčním bouřím a jejich doprovodným jevům, kde jsme se seznámili také se základními metodami předpovědi bouřek. Na konkrétních bouřkových situacích byly tyto metody ověřeny a současně byl popisován postup předpovědní výstražné služby ČHMÚ. Na základě námi dostupných údajů a na konkrétních případech výskytu silných konvekčních jevů na území České republiky roku 2008 jsme zkoumali úspěšnost jejich předpovědí a nastínili jsme možnosti zlepšování předpovědi konvekčních bouří v České republice do budoucna. Uvedená problematika dnes představuje jeden z nejaktuálnějších a nejintenzivněji studovaných meteorologických oborů. Rozšiřující se databáze ověřovaných informací o následcích silných bouří přináší stále nové podněty k přehodnocování metodik pro předpověď konvekce.

Protože každá synoptická situace je jedinečná, nelze závěry z jednotlivých zkoumaných případů zobecnit na všechny bouřkové události. Co ale měly jednotlivé výsledky společné, byla nedostatečná prostorová rozlišovací schopnost globálních modelů. V některých případech však přesto relativně dobře vystihly oblasti s nebezpečím výskytu konvekčních bouří. Vzhledem k možnostem globálních modelů však nelze jejich výsledky porovnávat s modelem lokálním, sloužily nám pouze orientačně. Model ALADIN se v některých případech relativně dobře vyrovnal s nástrahami předpovědi konvekce, méně často situaci dostatečně neodhadl. Údaje z aerologických měření nám sloužili spíše pro posouzení aktuálních podmínek počasí v dané lokalitě, protože dvě aerologické stanice pro celou Českou republiku nejsou dostatečně reprezentativní. Přesto případ z 25. 6. 2008 dokázal, že produkty získané z aerologického výstupu jsou plnohodnotné a můžou pomoci v předpovědi následujícího vývoje počasí.

Přestože fyzikální zákony, kterými se příroda řídí, se v průběhu času nemění a jejich princip zůstává stejný, není žádoucí předpovídat výskyt konvekčních bouří tímž způsobem, jako v minulosti. ČHMÚ i povětrnostní služby ve většině států světa neustále zkvalitňují monitoring a systém předpovědi počasí se zvyšujícím se důrazem na varovnou službu před nebezpečnými povětrnostními jevy. I přes obrovský pokrok ve výpočetní technice a v informačních technologiích, při předpovědi počasí stále není v našich možnostech předpovídat extrémní nebezpečné projevy počasí. Silné konvekční bouře, patřící k velmi působivým jevům, stále více poodhalují svá tajemství díky práci mnoha odborníků po celém světě. Ale i přes významné zlepšení znalostí o těchto procesech je a stále bude obtížné tyto jevy předpovídat s dostatečnou přesností.

Literatura

- [1] **Bednář J.** (1989): Pozoruhodné jevy v atmosféře. Academia, Praha.
- [2] **Bluestein H. B.** (1993): Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes, vol. II (Observations and Theory of Weather Systems). Oxford University Press, New York, Oxford, s. 444 - 455.
- [3] **Doswell Ch. A. III. ed.** (2001): Severe convective storms. Meteorological monographs, vol. 28, American Meteorological Society.
- [4] **Charvát Z.** (2006): Využití družicových snímků v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. 59, č. 1, s. 11 - 17.
- [5] **Kopáček J., Bednář J.** (2005): Jak vzniká počasí. Karolinum, Univerzita Karlova v Praze.
- [6] **Pechala F., Bednář J.** (1991): Příručka dynamické meteorologie. Academia, Praha.
- [7] **Pešice P., Sulan J., Řezáčová D.** (2003): Convection precursors in the Czech territory. *Atmospheric Research*, vol. 67 - 68, s. 523 - 532.
- [8] **Řezáčová D.** (2008): Matematické modelování oblačných a srážkových procesů v atmosféře. Přednáška zimního semestru na Matematicko-fyzikální fakultě UK, KMOP.
- [9] **Řezáčová D., Novák P., Kašpar M., Setvák M.** (2007): Fyzika oblaků a srážek. Academia, Praha.
- [10] **Sandev M., Šparlínek J.** (2005): Směrnice pro provádění systému integrované výstražné služby (SIVS). ČHMÚ a Odbor HMZ VGHMÚř, Praha.
- [11] **Setvák M., Novák P., Radová M.** (2008): Teplotní charakteristiky horní hranice oblačnosti konvektivních bouří na družicových snímcích a jejich interpretace. *Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 4, s. 97 - 105.
- [12] **Sobíšek B. a kol.** (1993): Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Academia & Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.
- [13] **Sokol Z., Řezáčová D.** (2001): Statistická korekce denních srážkových úhrnů stanovených radarem s využitím klasifikované regrese. *Meteorologické zprávy*, roč. 54, s. 46 - 56.

- [14] **Strachota J.** (1966): Ověření několika metod pro předpověď bouřek v letním pololetí 1965. *Meteorologické zprávy*, roč. 19, s. 105 - 110.
- [15] **Sulan J.** (2007): Silné konvekční bouře a hodograf větru - vybrané případy z let 2001–2006. *Meteorologické zprávy*, roč. 60, č. 5, s. 129 - 135.
- [16] **Sulan J., Pešice P., Staša P.** (2004): Výpočet konvekční dostupné potenciální energie „CAPE” a možnosti jeho využití v provozu ČHMÚ. *Meteorologické zprávy*, roč. 57, č. 3, s. 61 - 68.
- [17] **Šálek M., Kráčmar J.** (2002): Využití metod dálkové detekce pro předpovědní a výstražnou službu. In: *Počasí - moderní předpovědní metody, prevence a snižování následků katastrof*, Ministerstvo životního prostředí, k vydání připravil ČHMÚ.
- [18] **Táborský Z.** (1966): Porovnání některých metod předpovědi bouřek. *Meteorologické zprávy*, roč. 19, č. 6, s. 164 - 171.
- [19] **Valachová, M.** (2007): Předpověď indexů stability a porovnání jejich použitelnosti (úspěšnosti) při předpovědi bouřek (silných konvektivních jevů). Bakalářská práce, Matematicko-fyzikální fakulta UK, KMOP, Praha.
- [20] **Zacharov P., Řezáčová D.** (2005): Srovnání účinnosti diagnostických a prognostických charakteristik konvekčního prostředí. *Meteorologické zprávy*, roč. 58, č. 3, s. 65 - 72.

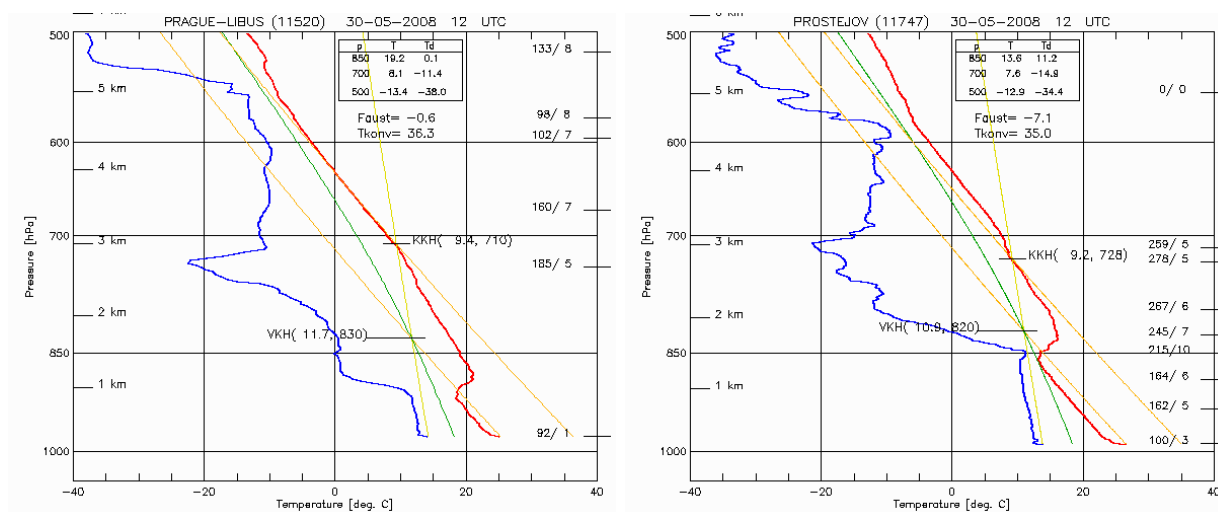
Internetové odkazy

- [21] Analýzy globálního předpovědního modelu GFS, archiv.
www.wetter3.de/Archiv
- [22] Družicové oddělení ČHMÚ (22. prosinec 2008)
www.chmi.cz/meteo/sat/sat_main.html
- [23] European Severe Weather Database.
www.essl.org/ESWD
- [24] European Storm Forecast Experiment, předpovědní mapy globálního modelu GFS.
estofex.org/modelmaps/browse_gfs.php
- [25] Hodografy ze stanic Praha, Prostějov a Vídeň, archiv od roku 2005 dostupný na intranetu ČHMÚ.
br-kalanka.chmi.cz/tempy
- [26] **Koenig M.:** Convective Initiation: Current Studies on Satellite Retrieved Indicators, prezentace pro Forschungskolloquium MeteoSwiss, EUMETSAT (19. květen 2009)
www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/forschung/veranstaltungen/archiv/doc_2009_1.Par.0004.DownloadFile.tmp/3koenigconvectiveinitiation.pdf

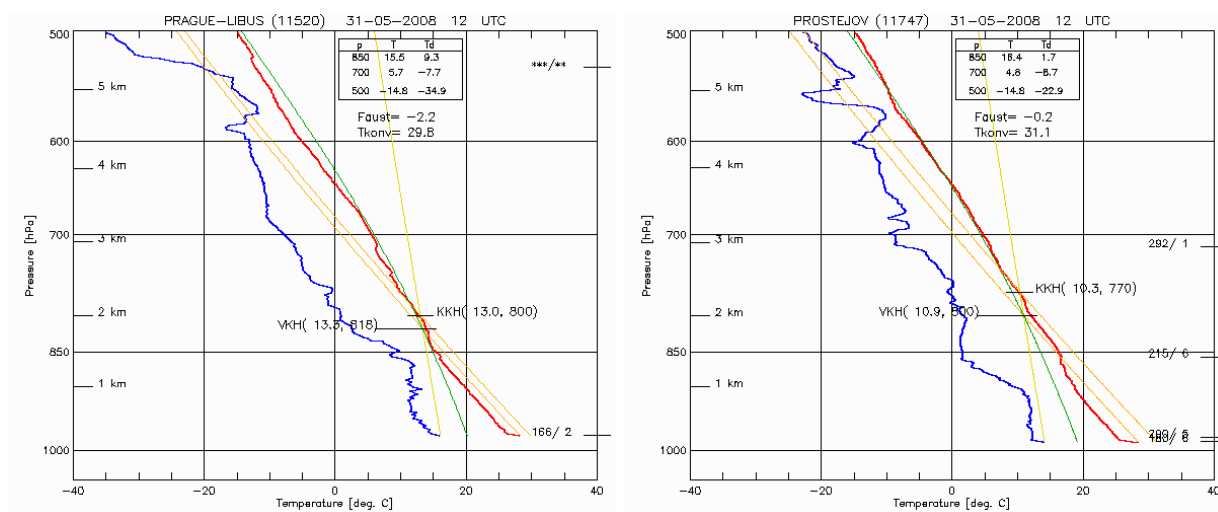
- [27] Meteoalarm - Alerting Europe for extreme Weather (17. červen 2009)
www.meteoalarm.eu
- [28] Oddělení aerologických a přízemních pozorování ČHMÚ (27. květen 2009)
www.chmi.cz/meteo/oap/oap_main.html
- [29] Oddělení numerických předpovědí počasí ČHMÚ (17. březen 2009)
www.chmi.cz/meteo/ov/aladin/index.php
- [30] Oddělení radarových měření ČHMÚ (14. srpen 2007)
www.chmi.cz/meteo/rad/rad_main.html
- [31] Oddělení radarových měření ČHMÚ - zpracování a vizualizace bleskových dat (17. březen 2009)
www.chmi.cz/meteo/rad/blesk
- [32] Sounding map, zdroj aktuálních i archivních aerologických dat z Evropy, Univerzita Wyoming, USA.
weather.uwyo.edu/upperair/europe.html
- [33] Systém integrované výstražné služby (SIVS) a Informační zprávy hlásné a předpovědní povodňové služby ČHMÚ (28. srpen 2007)
www.chmi.cz/meteo/om/sivs.html
- [34] **Šálek M.:** Nowcasting (16. říjen 2006)
www.chmi.cz/poboc/BR/rpp/salek/writings/nowcasting/nowcasting.html
- [35] Tornáda a jevy příbuzné na území České republiky a Slovenska (6. srpen 2008)
www.chmi.cz/torn
- [36] Transient Luminous Events (6. únor 2006)
www.nssl.noaa.gov/primer/lightning/ltg_tle.html
- [37] Výukový program COMET, dostupný online po zaregistrování.
www.comet.ucar.edu
- [38] Weather Glossary for Storm Spotters. NWS Norman, Oklahoma (4. březen 2009)
www.srh.noaa.gov/oun/severewx/glossary.php

PŘÍLOHA

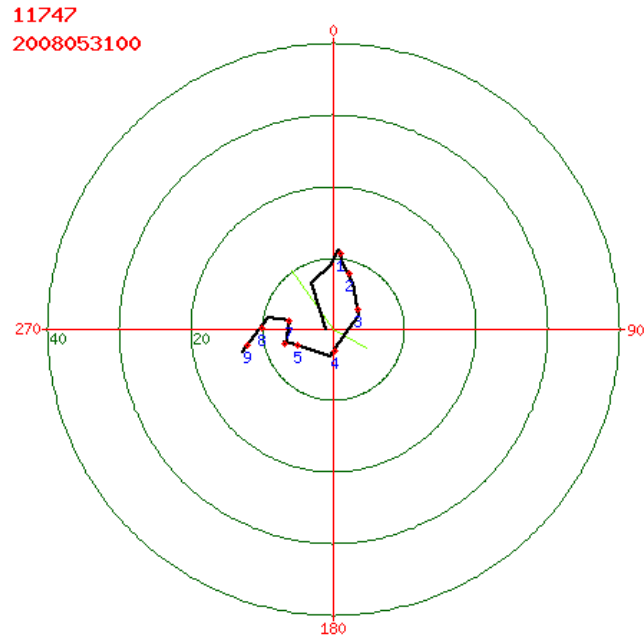
30. a 31. květen 2008



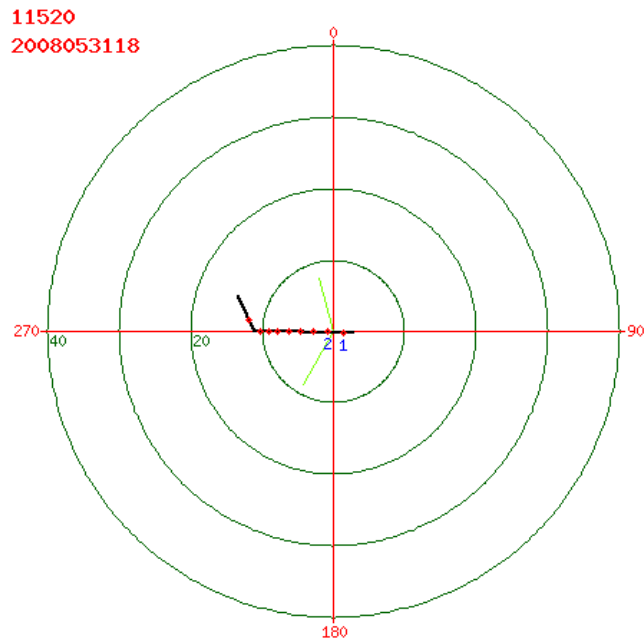
Obrázek 2: Aerologický výstup ze stanic Praha-Libuš a Prostějov ze dne 30. května 12 UTC.



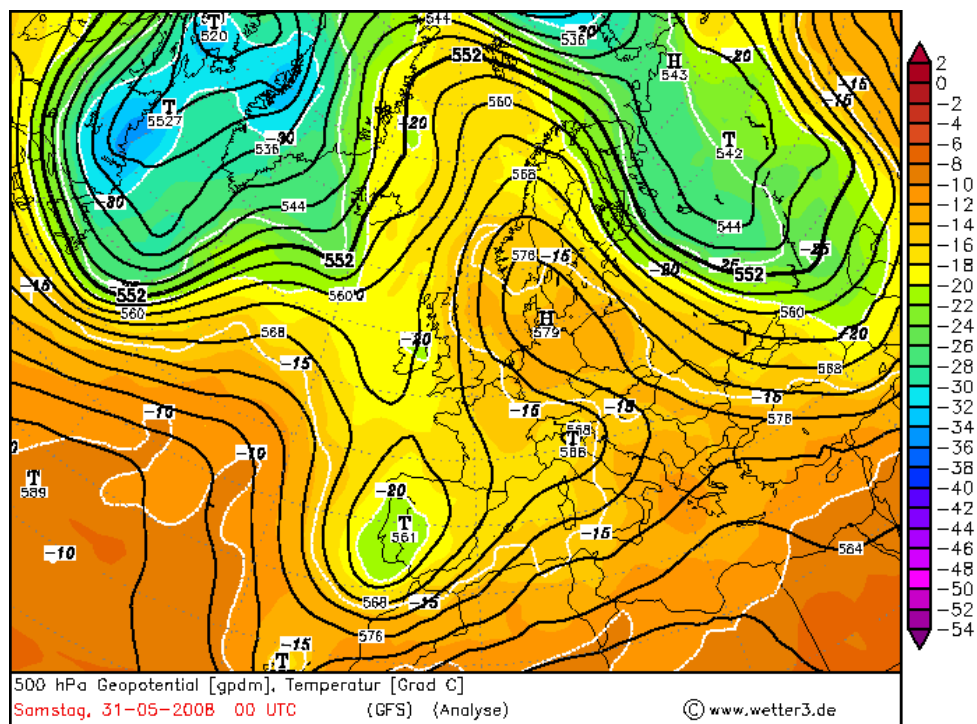
Obrázek 3: Aerologický výstup ze stanic Praha-Libuš a Prostějov ze dne 31. května 12 UTC.



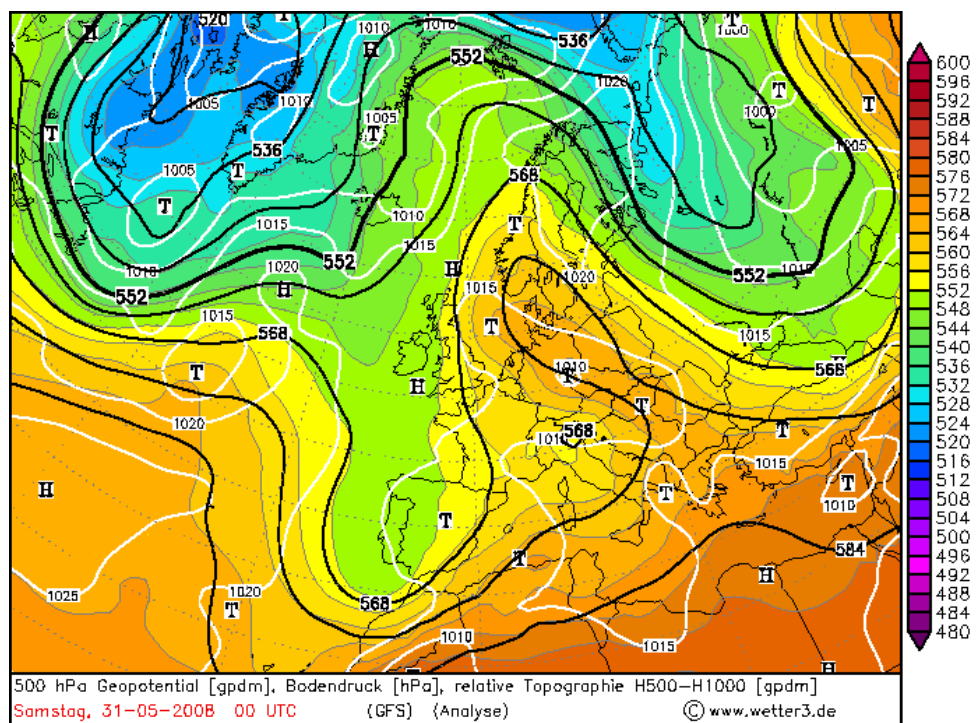
Obrázek 4: Hodograf větru ze stanice Prostějov z 31. 5. 2008 00 UTC. Hodnota veličiny SREH je nulová, stříh větru je roven $5,33 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.



Obrázek 5: Hodograf větru ze stanice Praha-Libuš z 31. 5. 2008 18 UTC. Hodnota veličiny SREH je nulová, stříh větru je roven $2,19 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

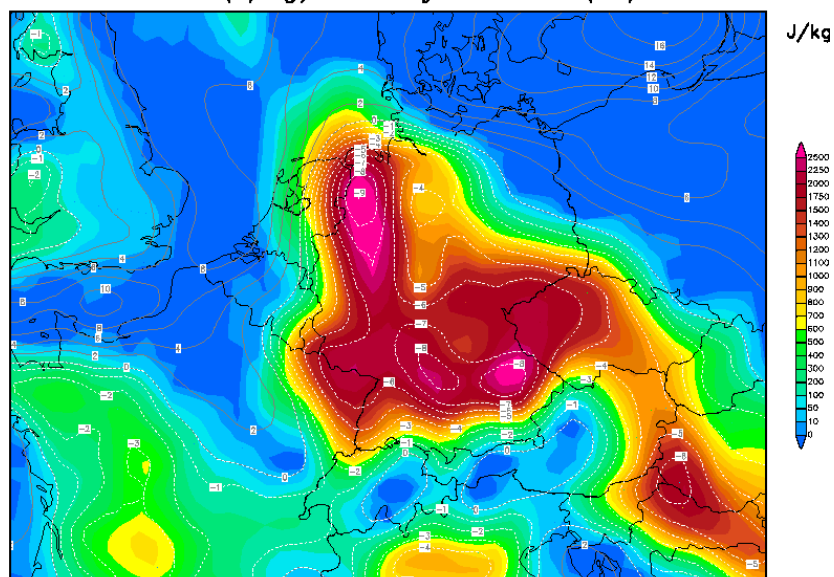


Obrázek 6: Hladina AT 500 hPa a teplota z 31. května 00 UTC, model GFS



Obrázek 7: Hladina AT 500 hPa, přízemní tlak a RT_{1000}^{500} z 31. května 00 UTC, model GFS

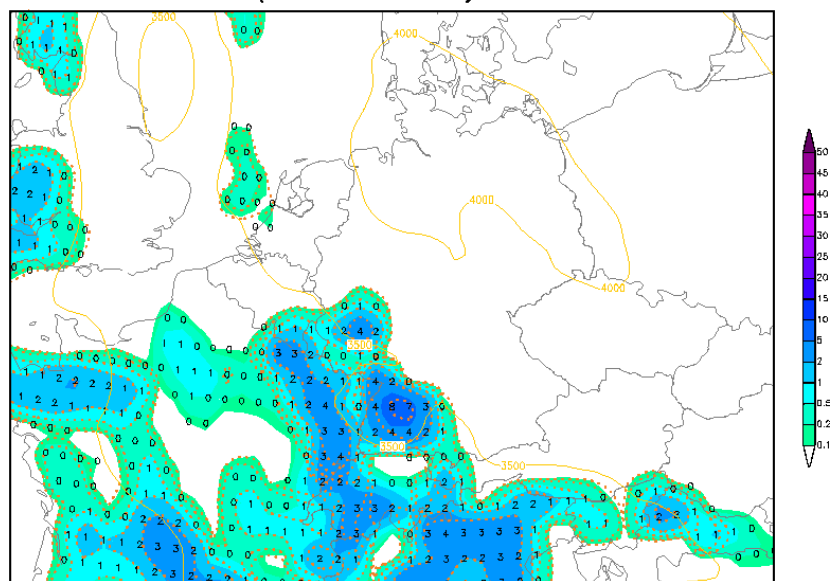
Init : Thu,29MAY2008 12Z Valid: Fri,30MAY2008 18Z
CAPE (J/kg) und Lifted Index (°C)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

Obrázek 8: Předpověď hodnoty CAPE a *LI* z globálního modelu GFS pro 30. květen 18 UTC, běh modelu z 29. května 12 UTC

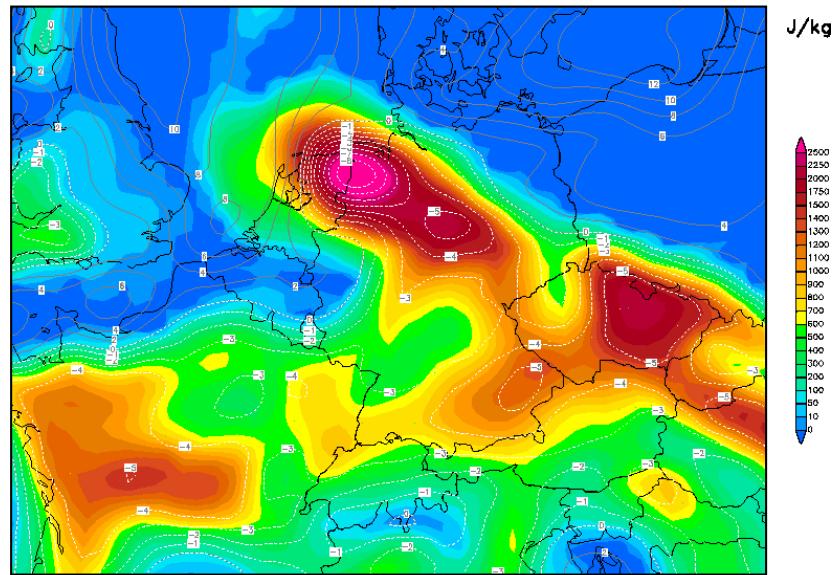
Init : Thu,29MAY2008 12Z Valid: Fri,30MAY2008 18Z
3h-Nds in mm (rot=konvektiv) + 0°-Grenze in m



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

Obrázek 9: Předpověď tříhodinového úhrnu srážek z globálního modelu GFS pro 30. květen 18 UTC, běh modelu z 29. května 12 UTC

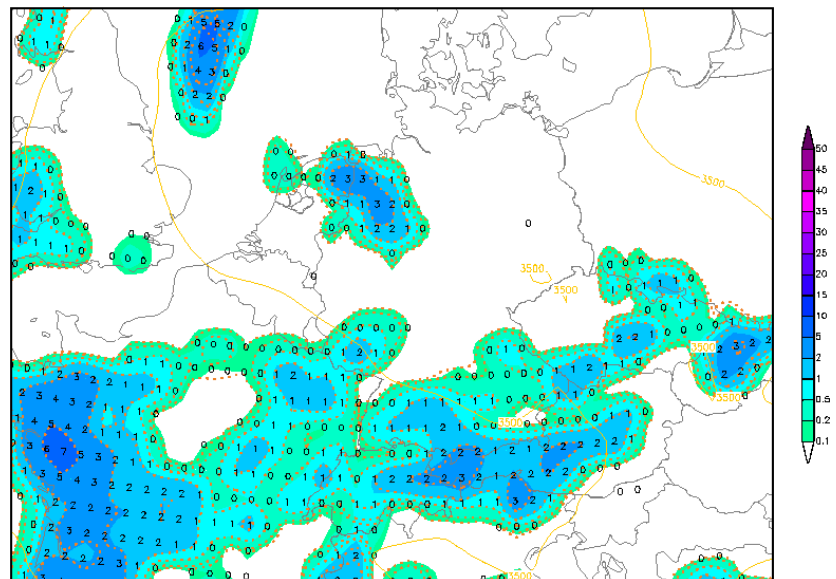
Init : Thu,29MAY2008 12Z Valid: Sat,31MAY2008 18Z
CAPE (J/kg) und Lifted Index (°C)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

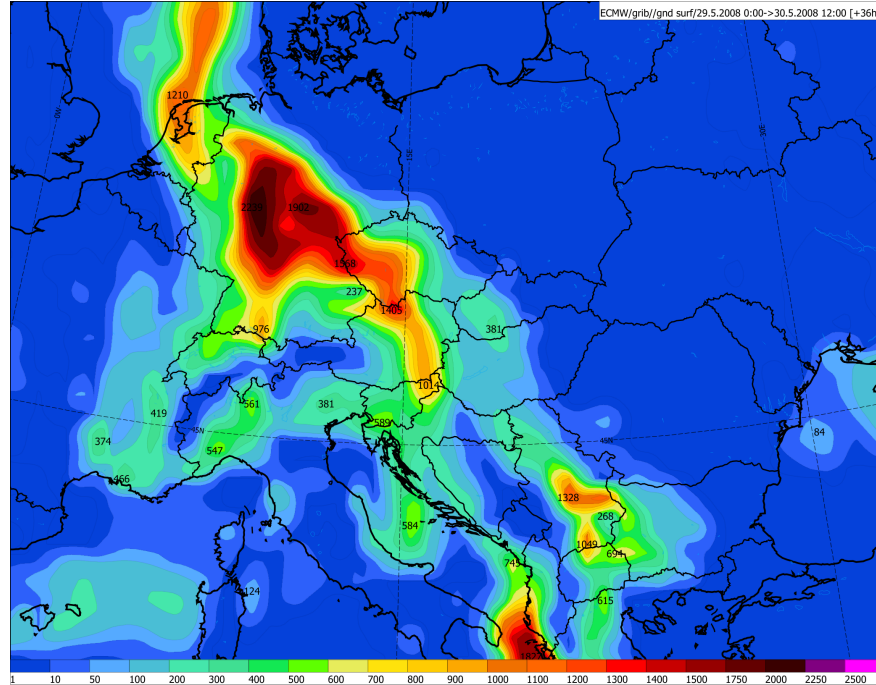
Obrázek 10: Předpověď hodnoty CAPE a LI z globálního modelu GFS pro 31. květen 18 UTC, běh modelu z 29. května 12 UTC

Init : Thu,29MAY2008 12Z Valid: Sat,31MAY2008 18Z
3h-Nds in mm (rot=konvektiv) + 0°-Grenze in m

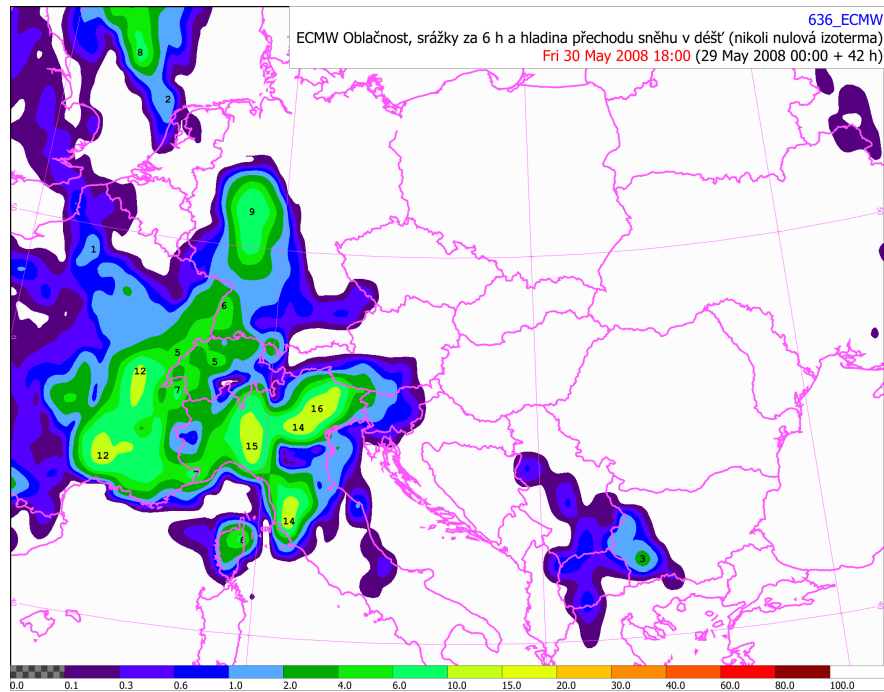


Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

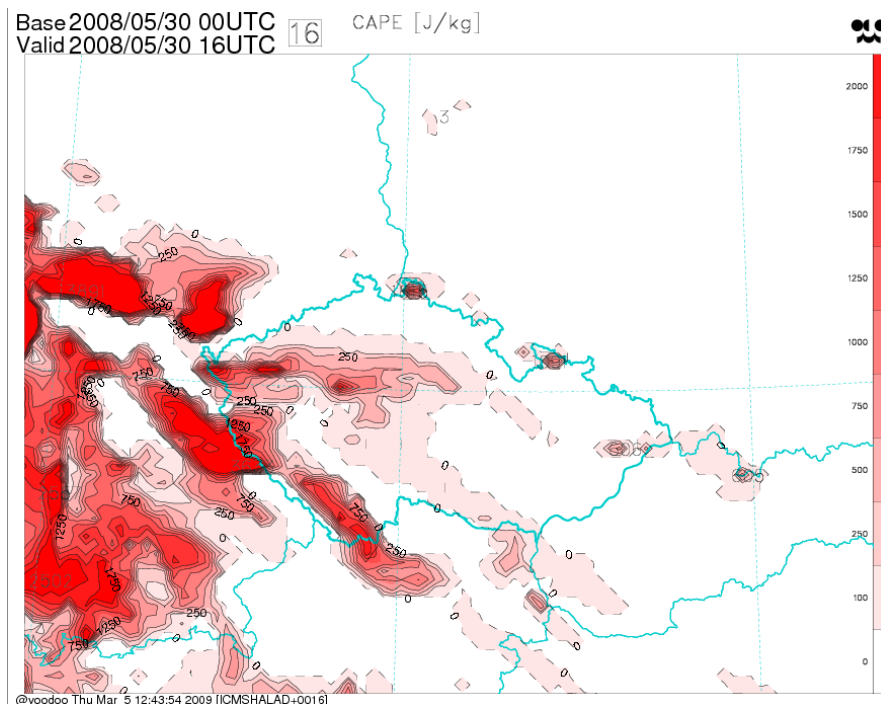
Obrázek 11: Předpověď tříhodinového úhrnu srážek z globálního modelu GFS pro 31. květen 18 UTC, běh modelu z 29. května 12 UTC



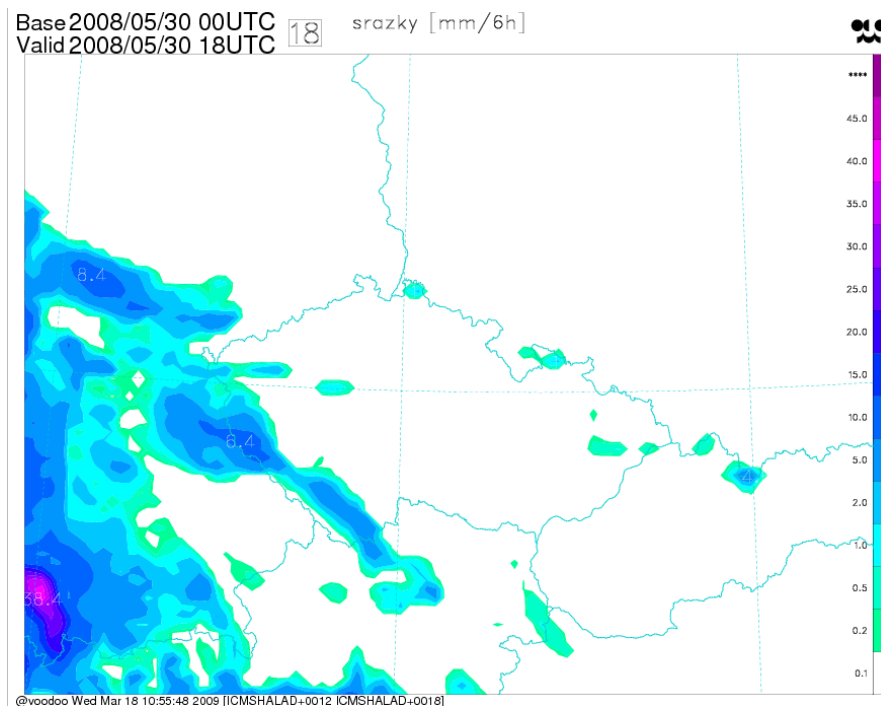
Obrázek 12: Předpověď hodnoty CAPE z globálního modelu ECMWF pro 30. květen 12 UTC, běh modelu z 29. května 00 UTC



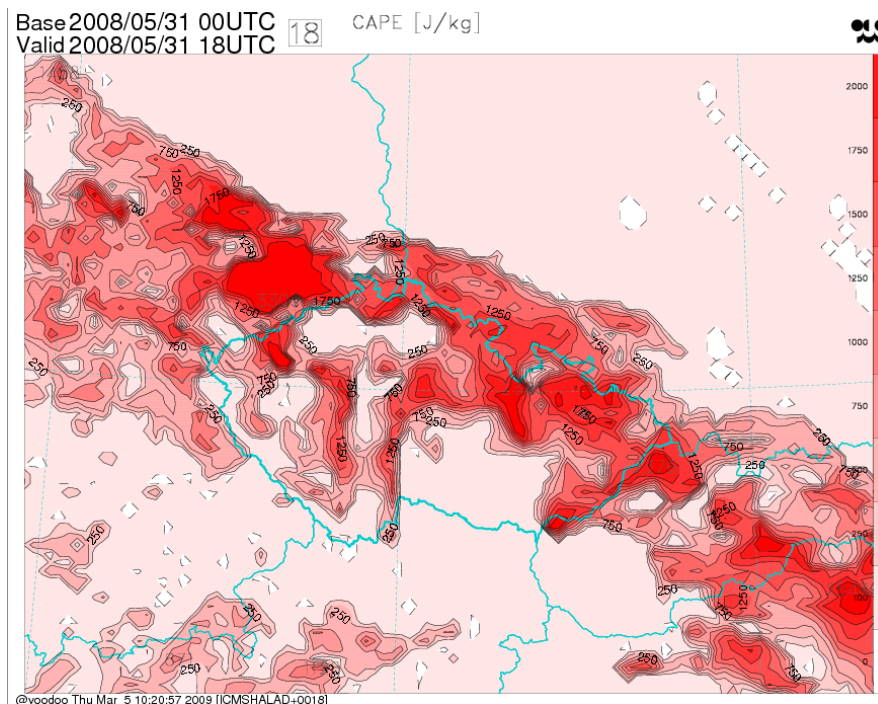
Obrázek 13: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek globálního modelu ECMWF pro 30. květen 18 UTC, běh modelu z 29. května 00 UTC



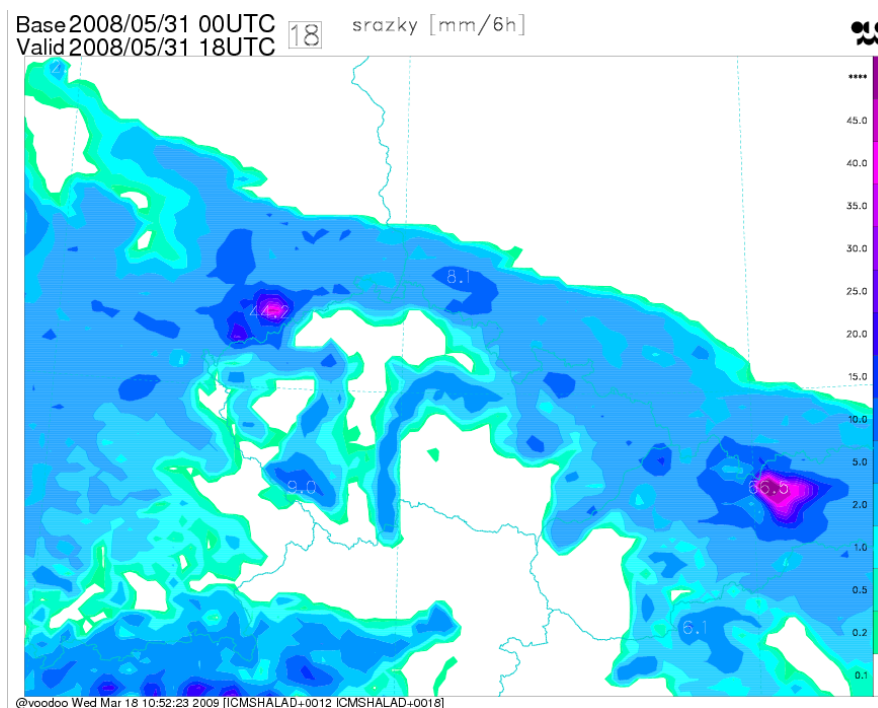
Obrázek 16: Předpověď hodnoty CAPE z lokálního modelu ALADIN pro 30. květen 16 UTC



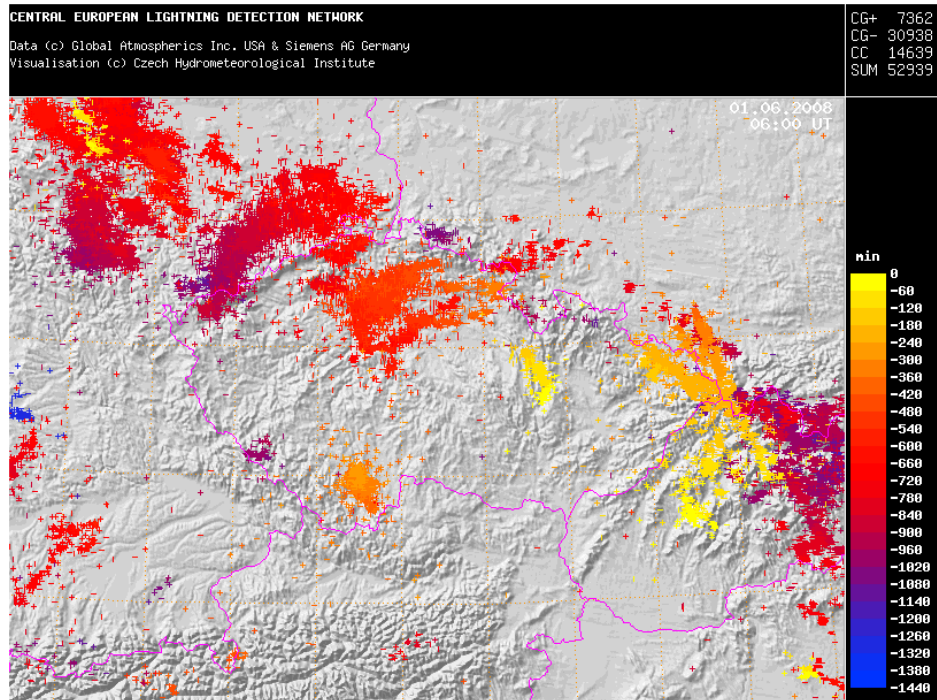
Obrázek 17: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek z lokálního modelu ALADIN pro 30. květen 18 UTC



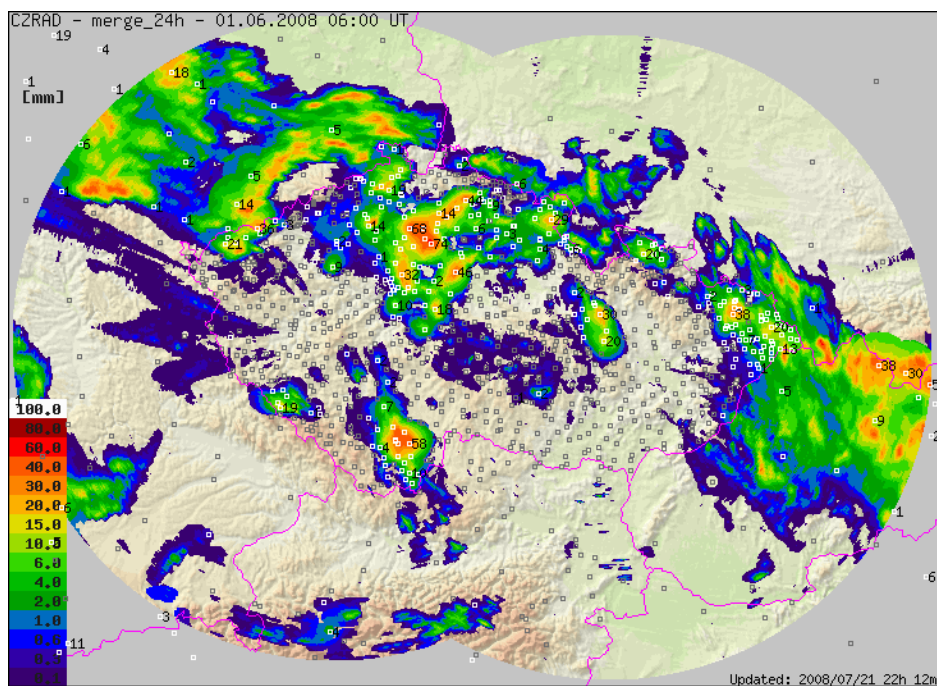
Obrázek 18: Předpověď hodnoty CAPE z lokálního modelu ALADIN pro 31. květen 18 UTC



Obrázek 19: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek z lokálního modelu ALADIN pro 31. květen 18 UTC

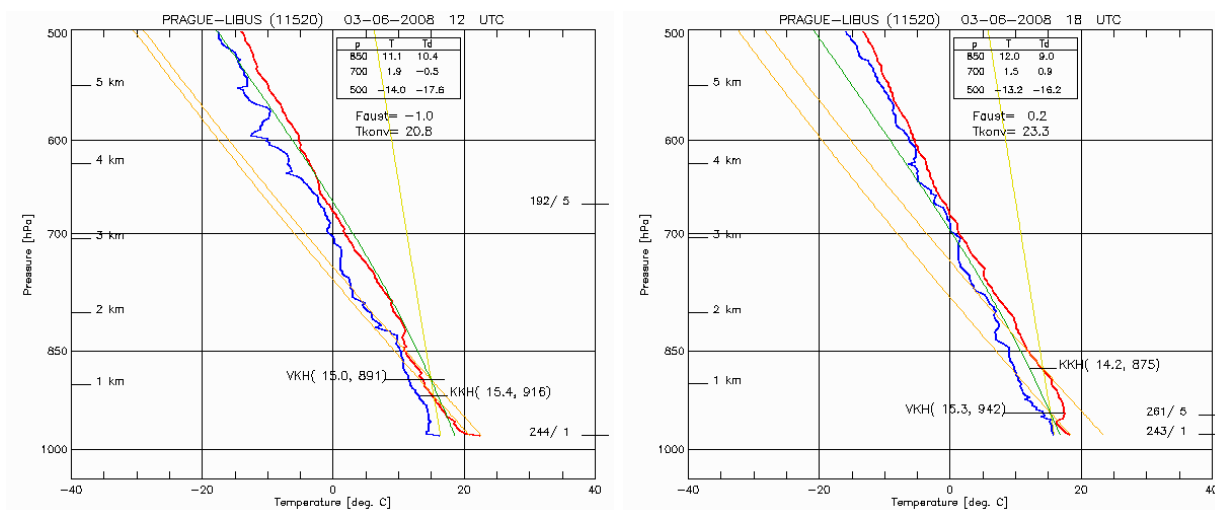


Obrázek 20: Suma bleskových výbojů za 31. 5. 2008

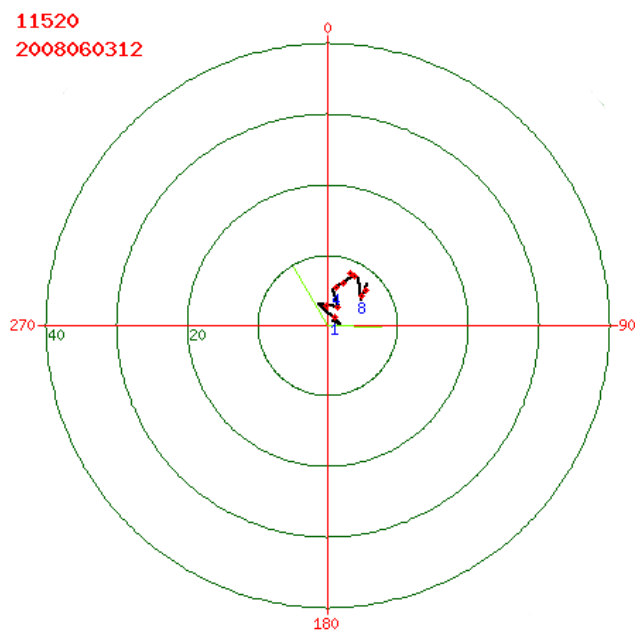


Obrázek 21: Celkový úhrn srážek za 31. 5. 2008, odhad srážek získaný kombinací adjustovaných radarových odhadů srážek a srážkoměrných údajů, tzv. MERGE

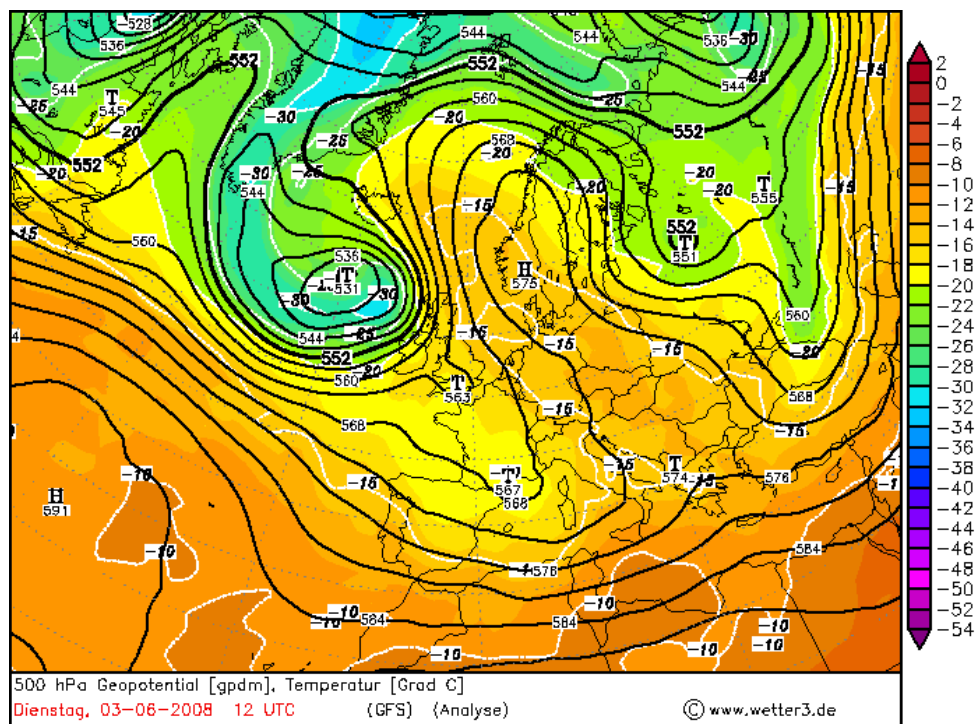
3. červen 2008



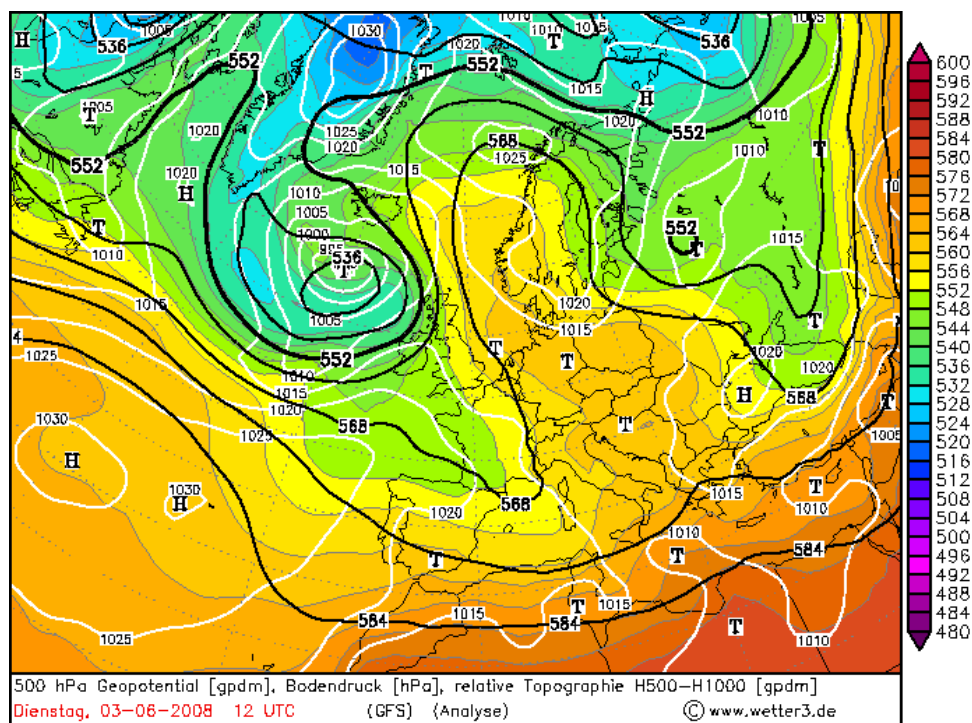
Obrázek 22: Aerologický výstup ze stanice Praha-Libuš ze dne 3. června 12 a 18 UTC.



Obrázek 23: Hodograf větru ze stanice Praha-Libuš 3. 6. 2008 12 UTC. Hodnota veličiny SREH je $19 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, stříh větru je roven $2,99 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

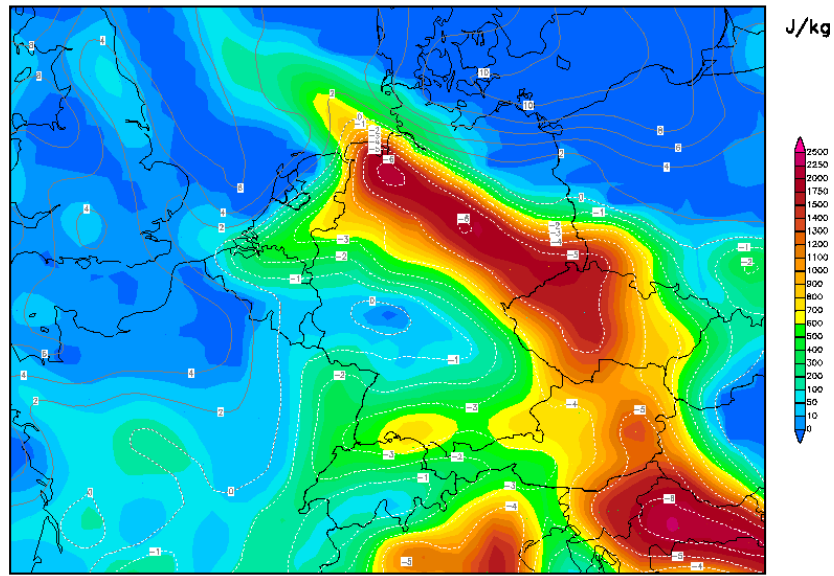


Obrázek 24: Hladina AT 500 hPa a teplota z 3. června 12 UTC, model GFS



Obrázek 25: Hladina AT 500 hPa, přízemní tlak a RT_{1000}^{500} z 3. června 12 UTC, model GFS

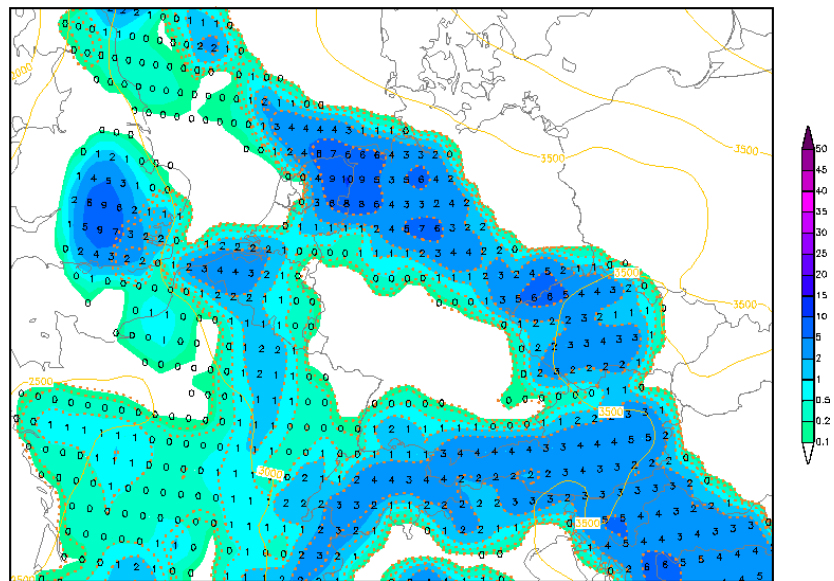
Init : Tue,03JUN2008 00Z Valid: Tue,03JUN2008 18Z
CAPE (J/kg) und Lifted Index (°C)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

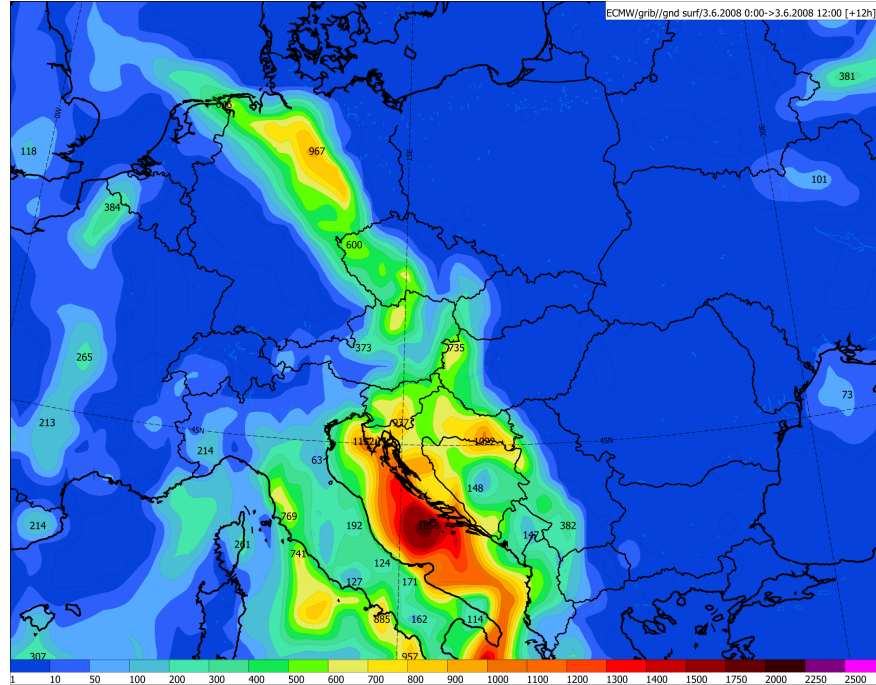
Obrázek 26: Předpověď hodnoty CAPE a *LI* z globálního modelu GFS pro 3. červen 18 UTC, běh modelu z 3. června 00 UTC

Init : Tue,03JUN2008 00Z Valid: Tue,03JUN2008 15Z
3h-Nds in mm (rot=konvektiv) + 0°-Grenze in m

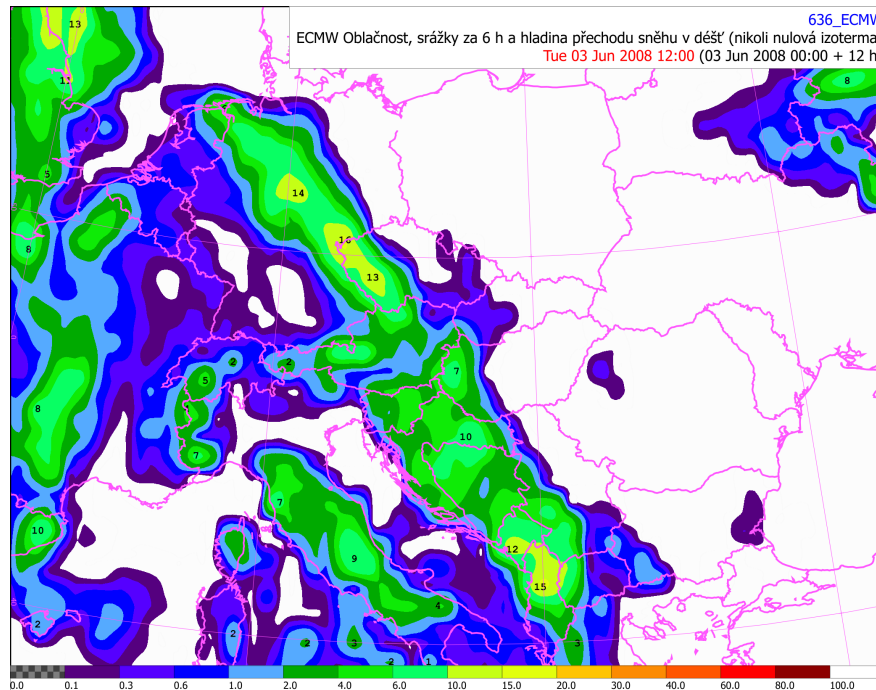


Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

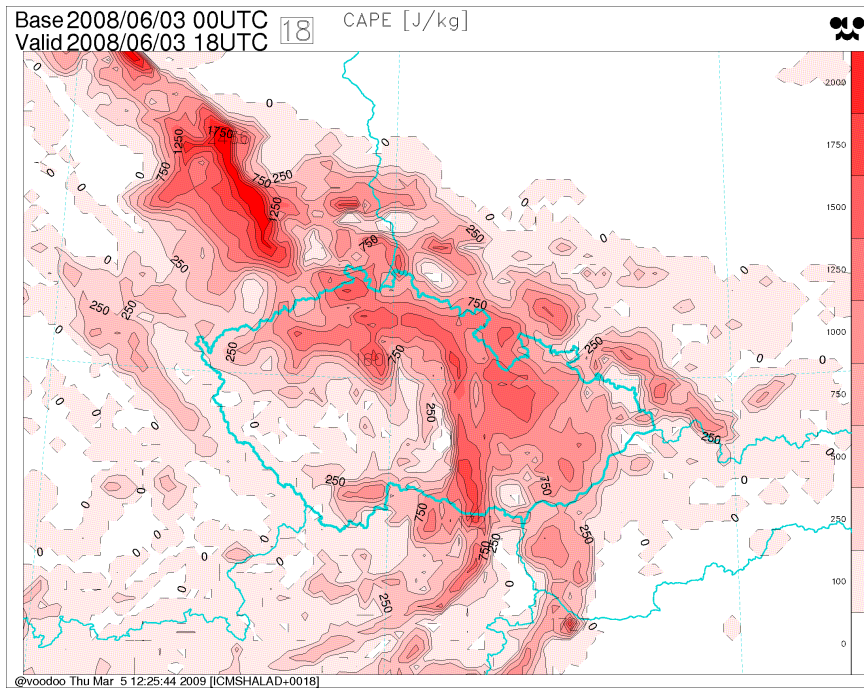
Obrázek 27: Předpověď tříhodinového úhrnu srážek z globálního modelu GFS pro 3. červen 15 UTC, běh modelu z 3. června 00 UTC



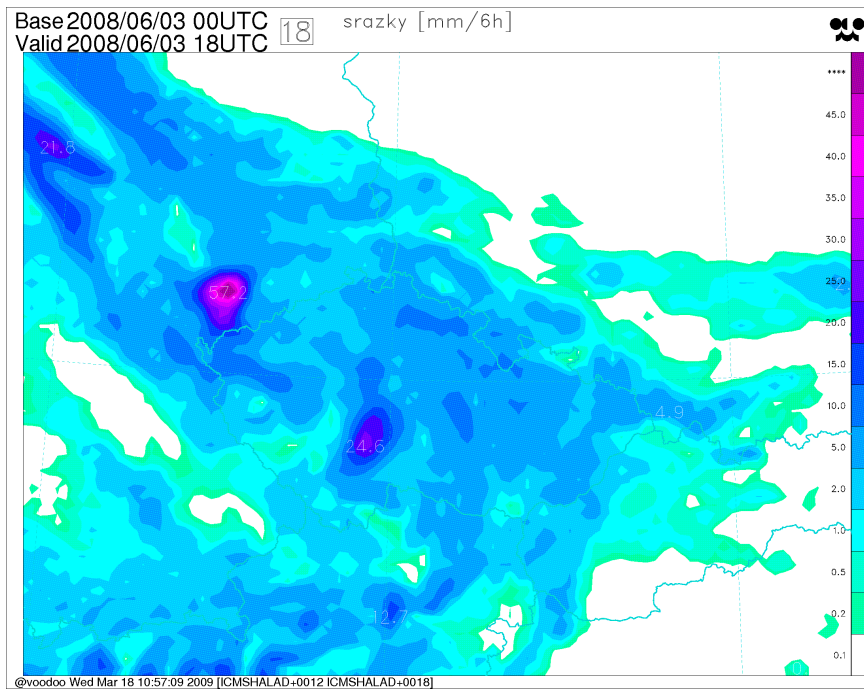
Obrázek 28: Předpověď hodnoty CAPE z globálního modelu ECMWF pro 3. červen 12 UTC, běh modelu z 3. června 00 UTC



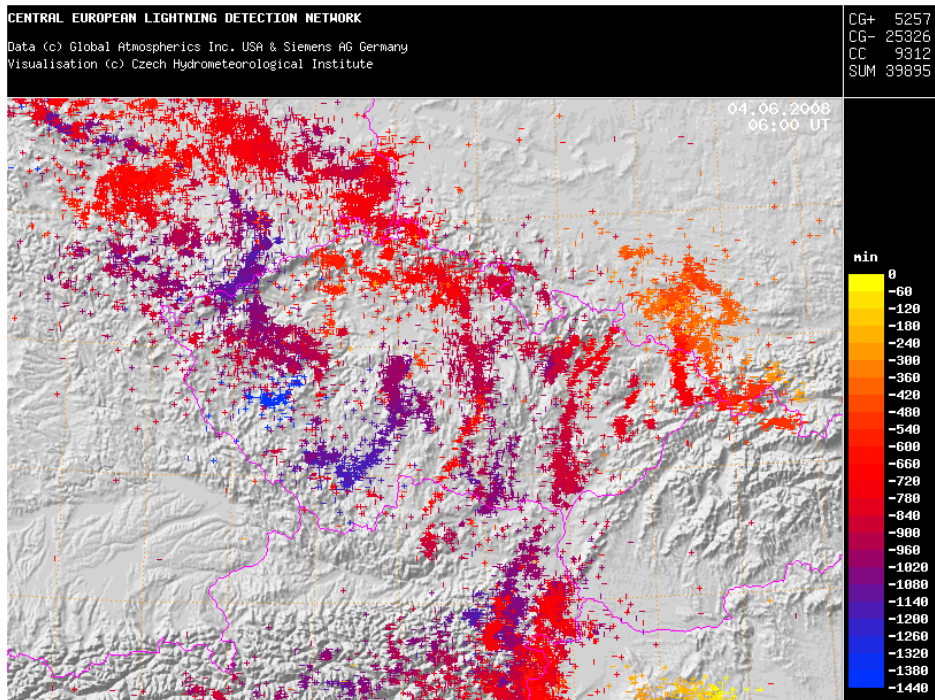
Obrázek 29: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek globálního modelu ECMWF pro 3. červen 12 UTC, běh modelu z 3. června 00 UTC



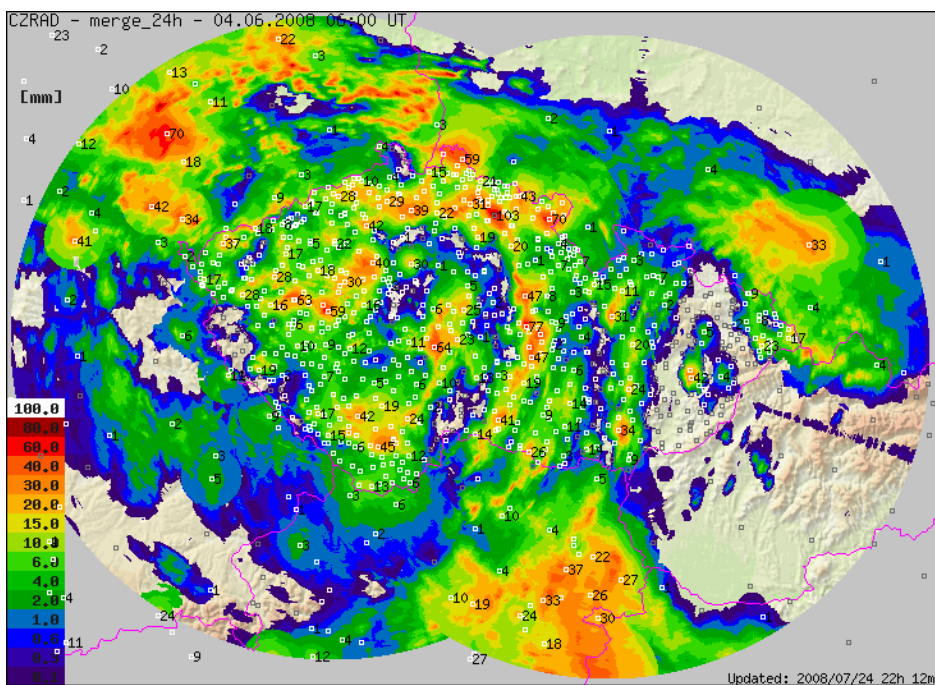
Obrázek 30: Předpověď hodnoty CAPE z lokálního modelu ALADIN pro 3. červen 18 UTC



Obrázek 31: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek z lokálního modelu ALADIN pro 3. červen 18 UTC

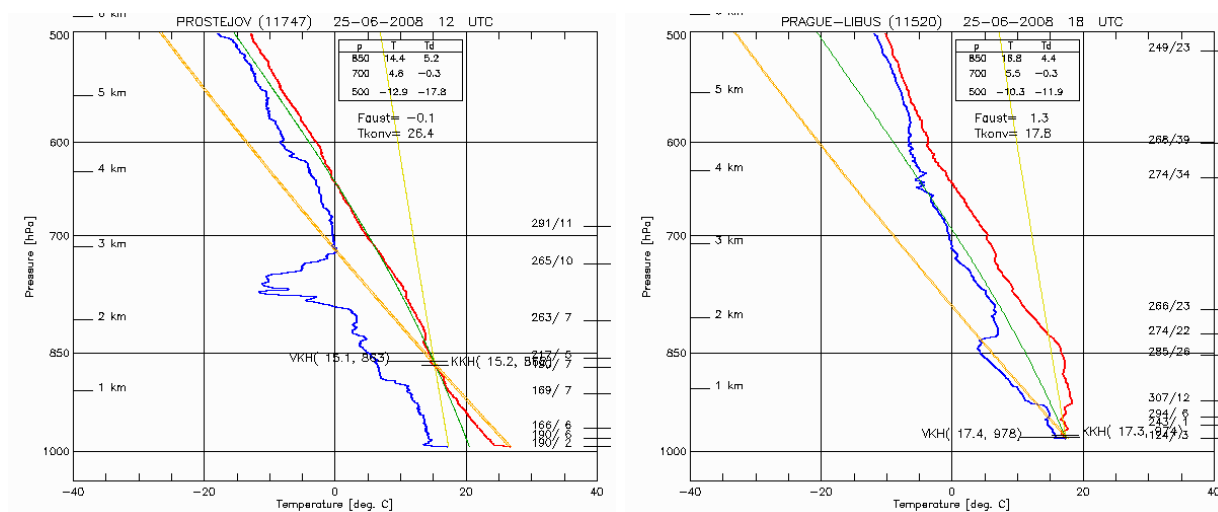


Obrázek 32: Suma bleskových výbojů za 3. 6. 2008

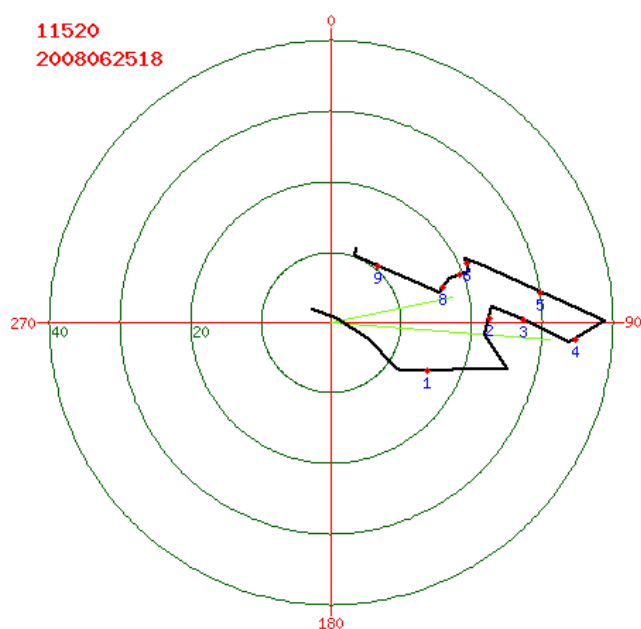


Obrázek 33: Celkový úhrn srážek za 3. 6. 2008, odhad srážek získaný kombinací adjustovaných radarových odhadů srážek a srážkoměrných údajů, tzv. MERGE

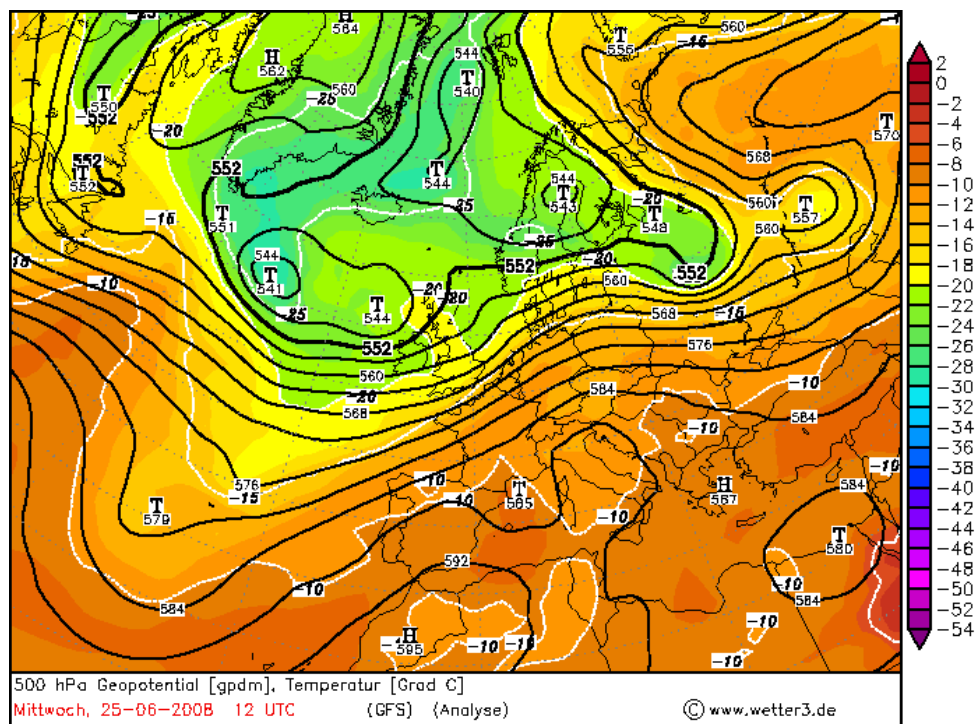
25. červen 2008



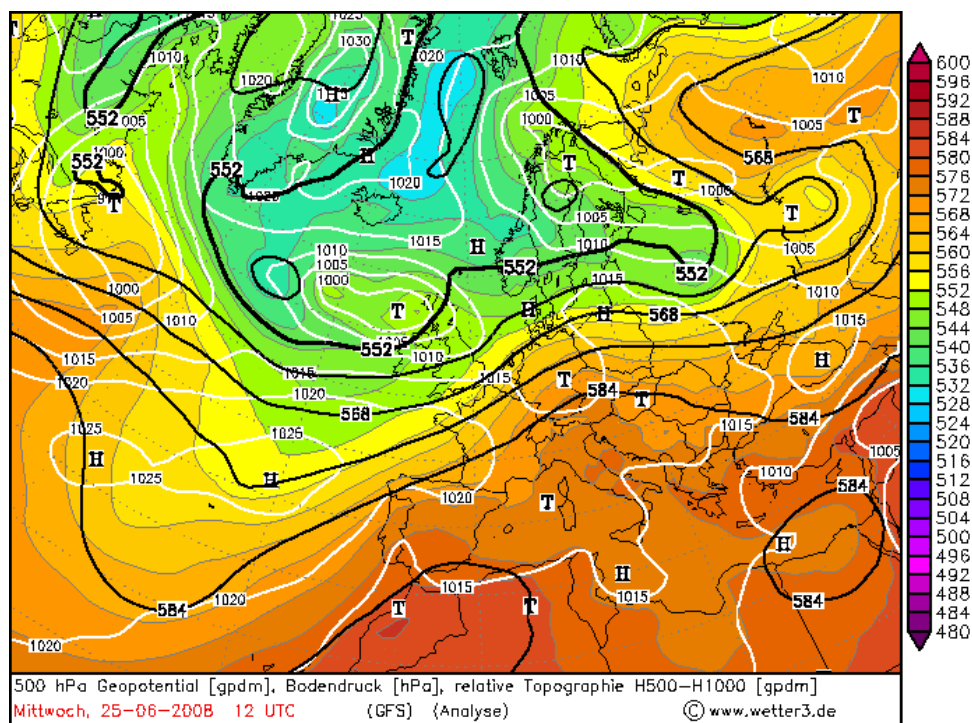
Obrázek 34: Aerologický výstup ze stanic Prostějov a Praha-Libuš ze dne 25. června 12 a 18 UTC.



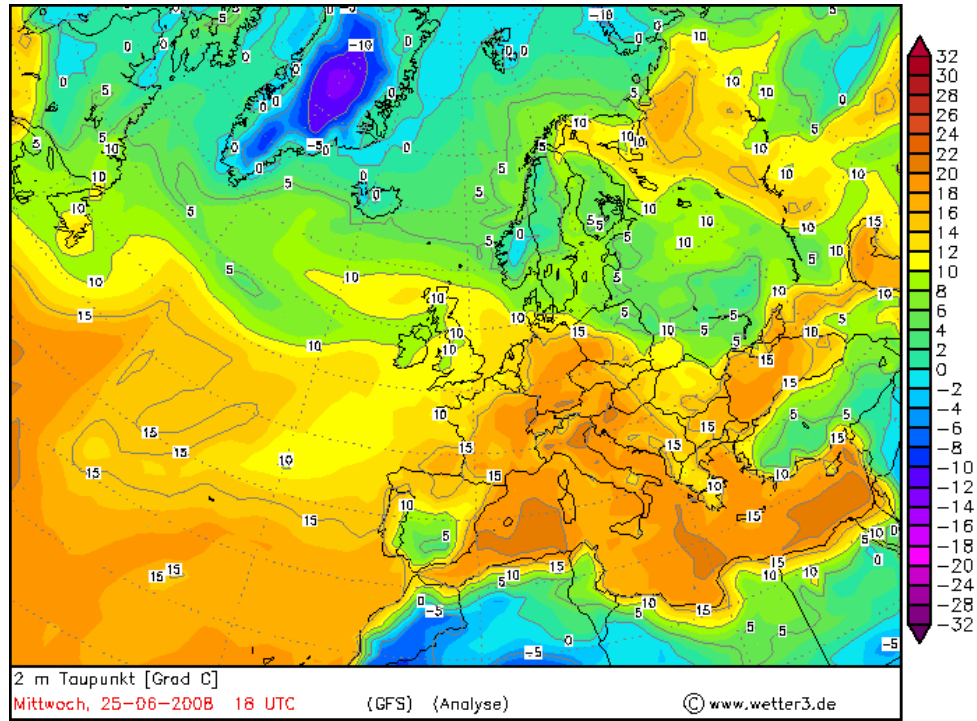
Obrázek 35: Hodograf větru ze stanice Praha-Libuš 25. 6. 2008 18 UTC. Hodnota veličiny SREH je nulová, stříh větru je roven $11,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.



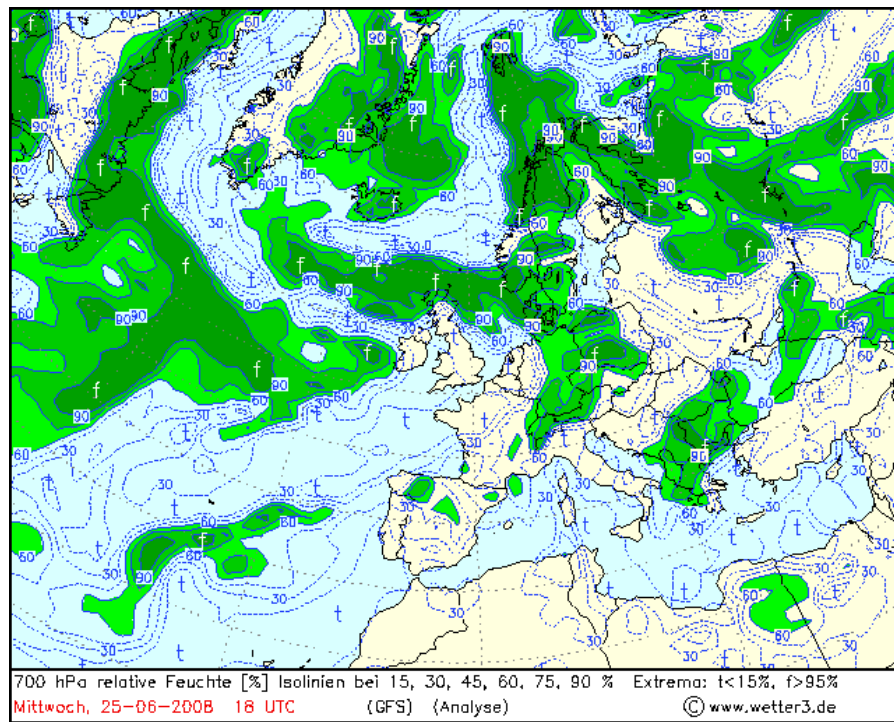
Obrázek 36: Hladina AT 500 hPa a teplota z 25. června 12 UTC, model GFS



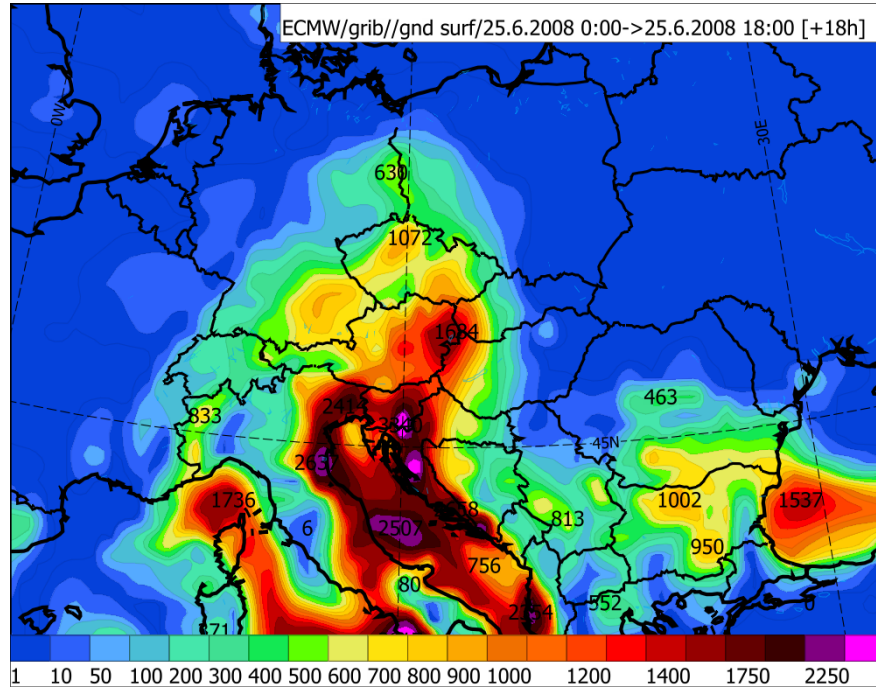
Obrázek 37: Hladina AT 500 hPa, přízemní tlak a RT_{1000}^{500} z 25. června 12 UTC, model GFS



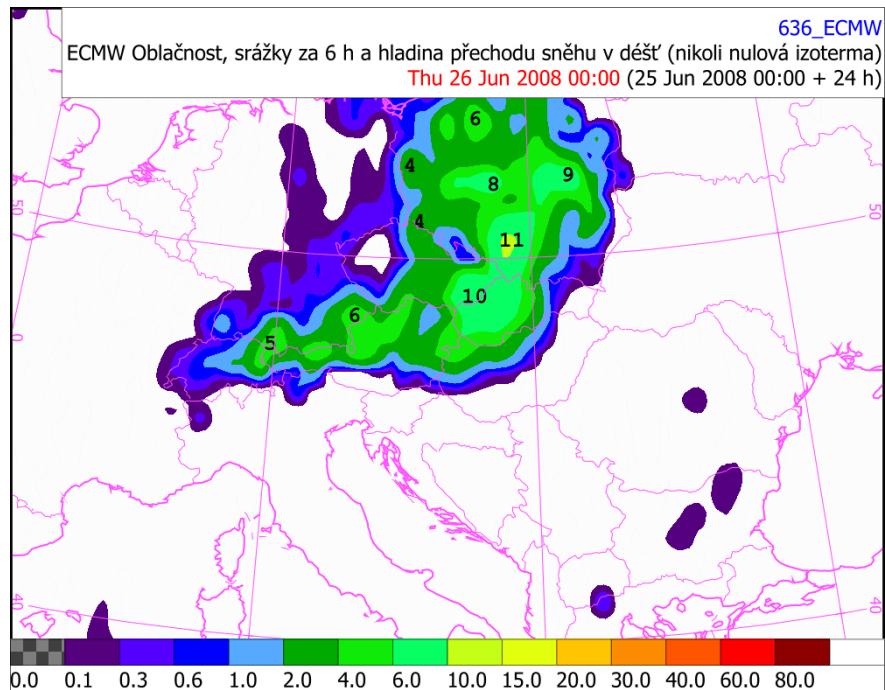
Obrázek 38: Teplota rosného bodu ve 2 m nad zemí z 25. června 18 UTC, model GFS



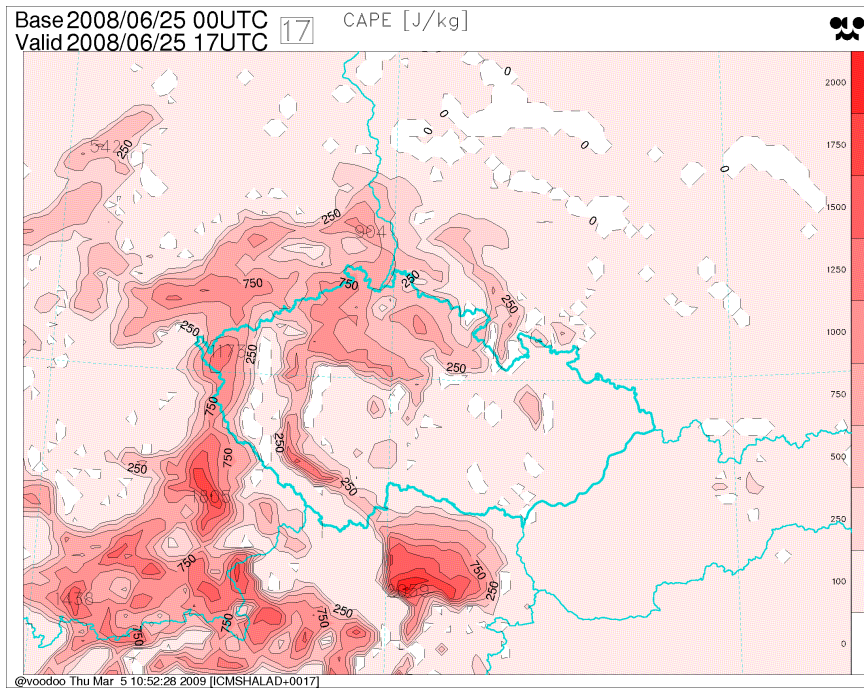
Obrázek 39: Relativní vlhkost v hladině 700 hPa z 25. června 18 UTC, model GFS



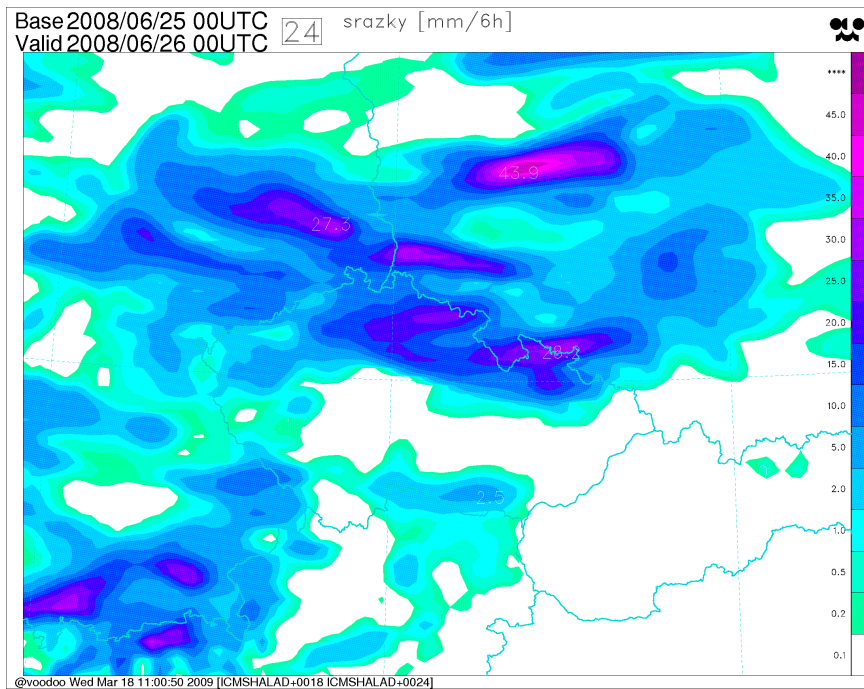
Obrázek 40: Předpověď hodnoty CAPE z globálního modelu ECMWF pro 25. červen 18 UTC, běh modelu z 25. června 00 UTC



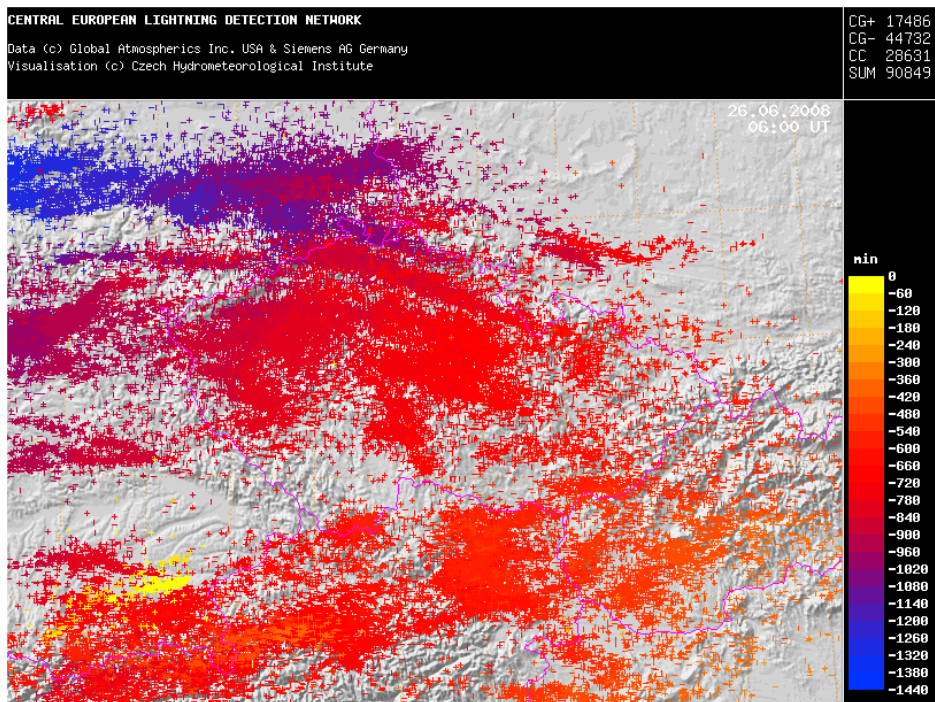
Obrázek 41: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek globálního modelu ECMWF pro 26. červenec 00 UTC, běh modelu z 25. června 00 UTC



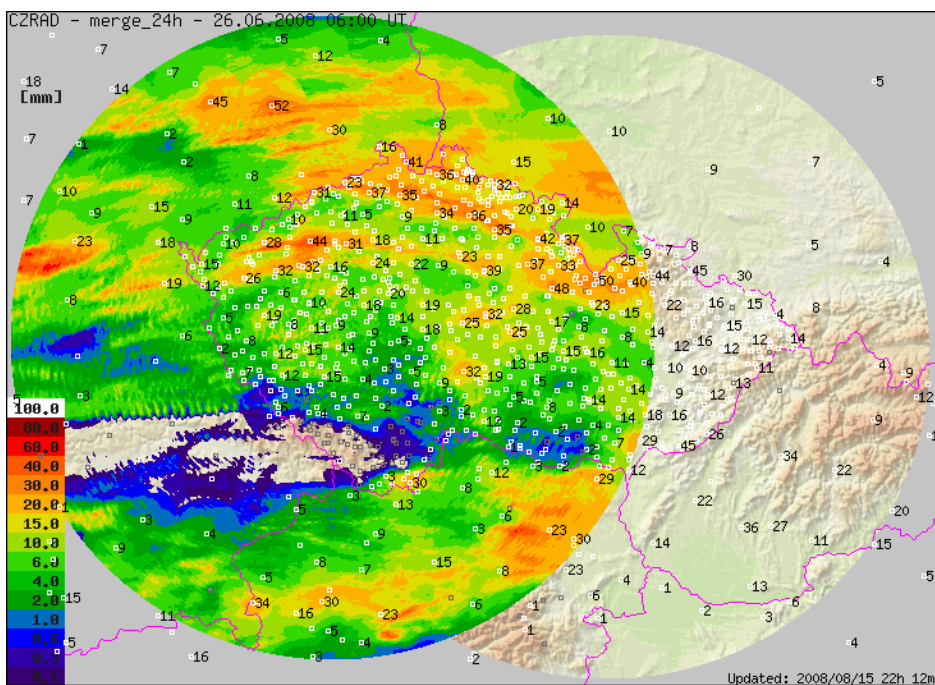
Obrázek 42: Předpověď hodnoty CAPE z lokálního modelu ALADIN pro 25. červen 17 UTC



Obrázek 43: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek z lokálního modelu ALADIN pro 26. červen 00 UTC

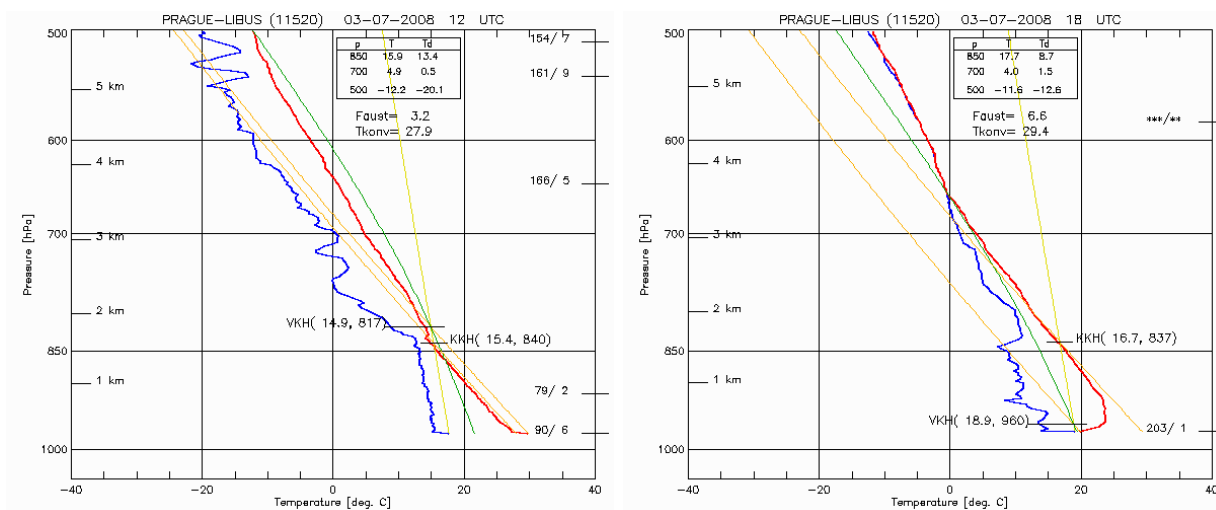


Obrázek 44: Suma bleskových výbojů za 25. 6. 2008

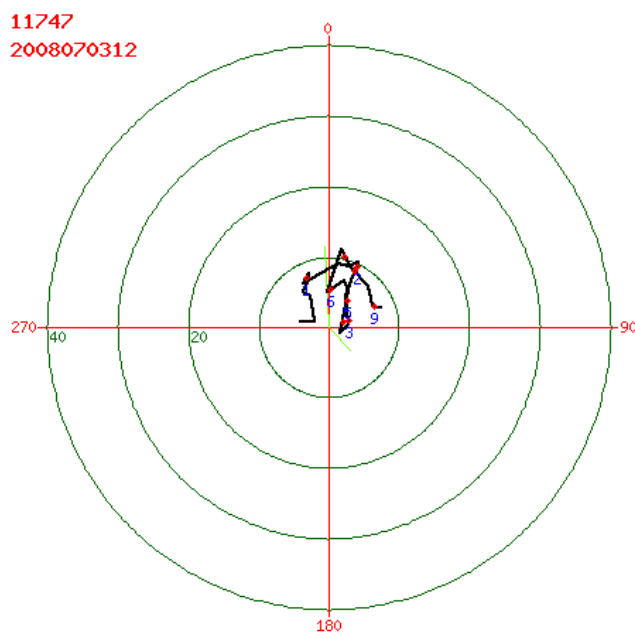


Obrázek 45: Celkový úhrn srážek za 25. 6. 2008, odhad srážek získaný kombinací adjustovaných radarových odhadů srážek a srážkoměrných údajů, tzv. MERGE

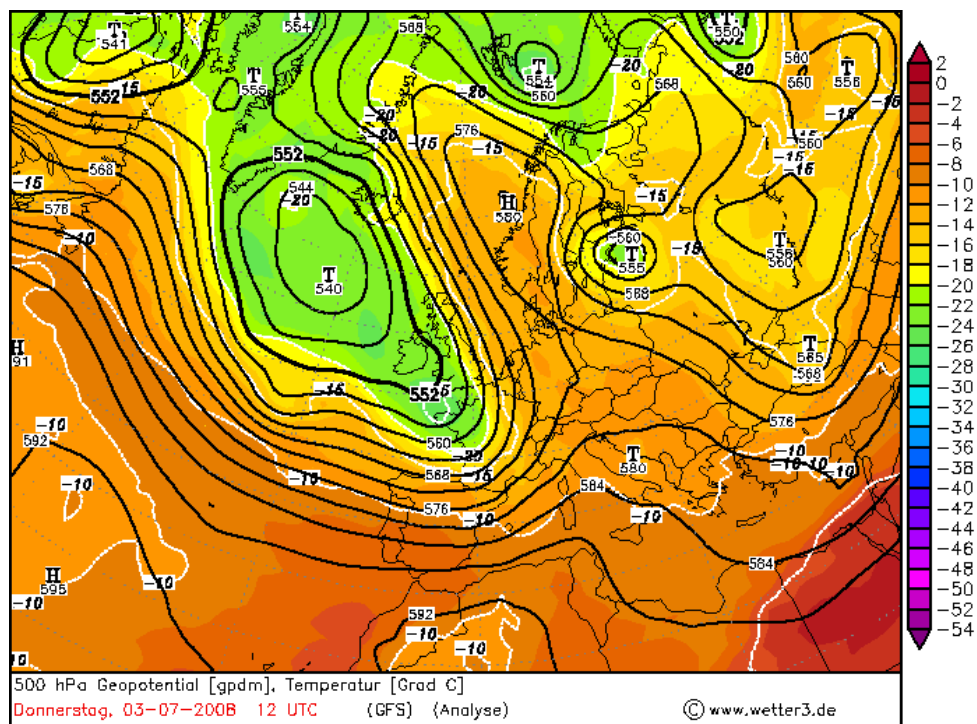
3. červenec 2008



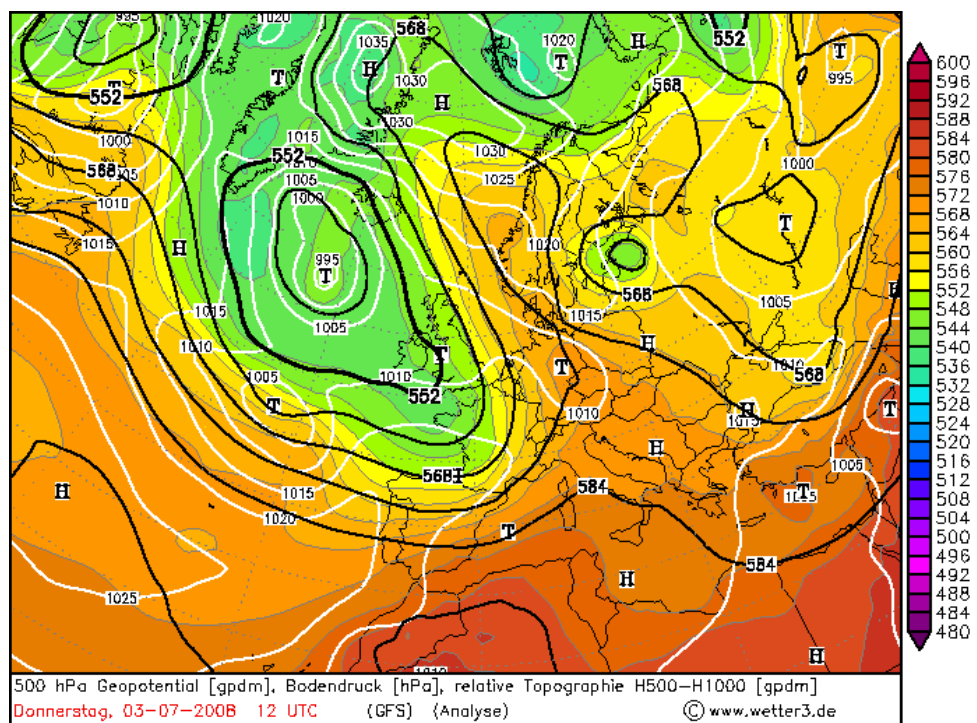
Obrázek 46: Aerologický výstup ze stanice Praha-Libuš ze dne 3. července 12 a 18 UTC.



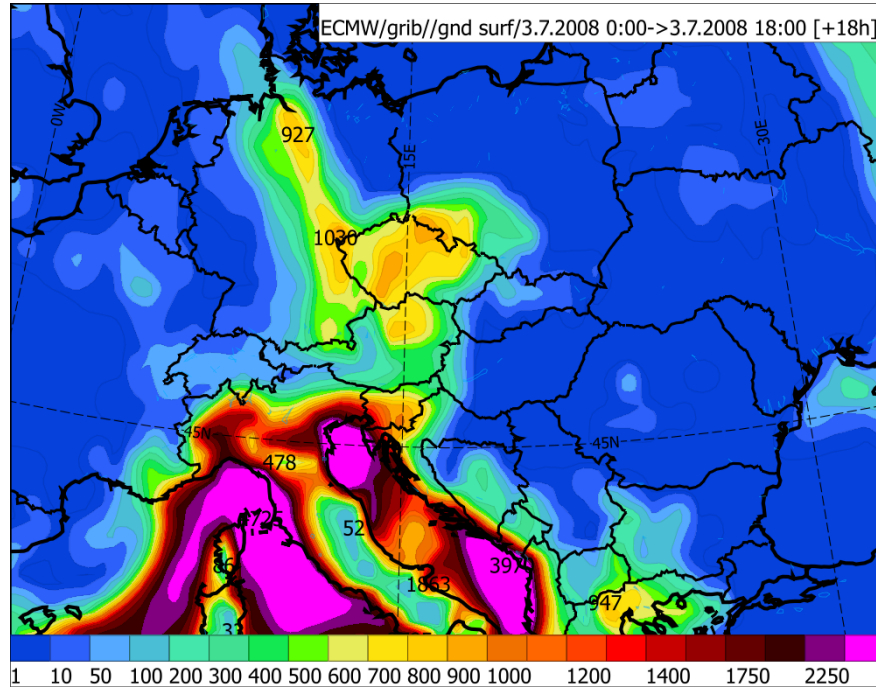
Obrázek 47: Hodograf větru ze stanice Prostějov 3. 7. 2008 12 UTC. Hodnota veličiny SREH je $24 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, stříh větru je roven $5,56 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.



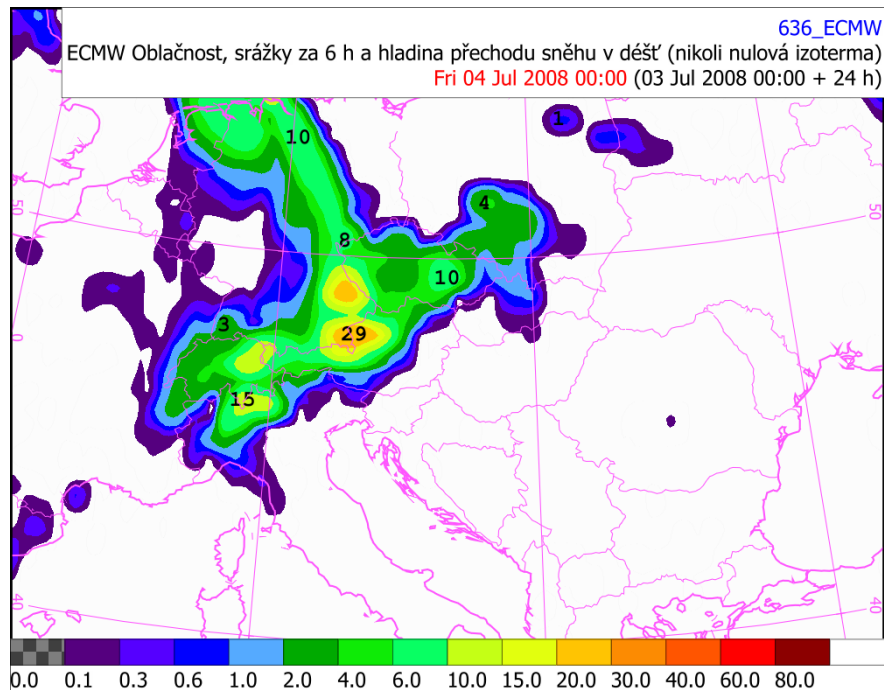
Obrázek 48: Hladina AT 500 hPa a teplota z 3. července 12 UTC, model GFS



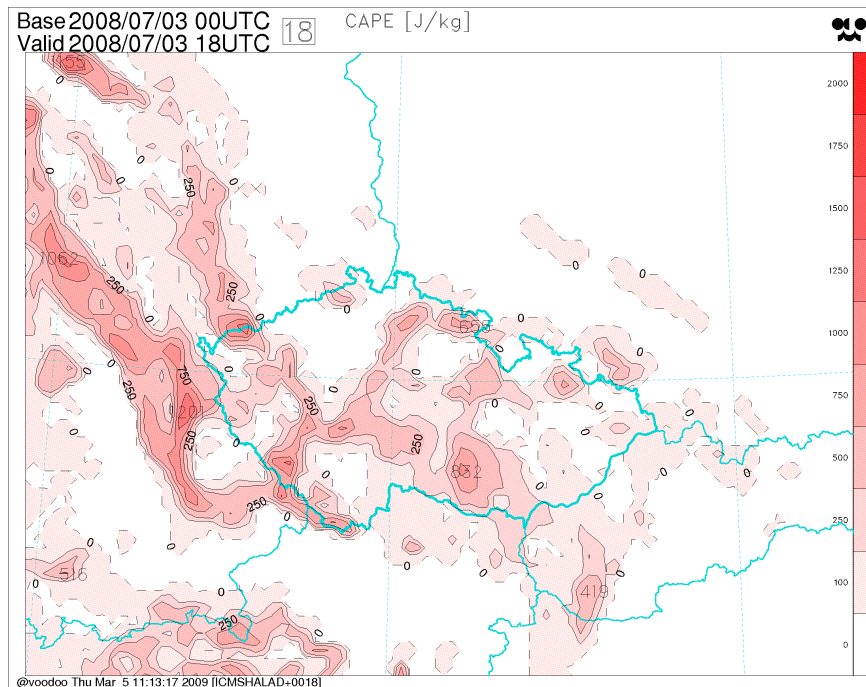
Obrázek 49: Hladina AT 500 hPa, přízemní tlak a RT_{1000}^{500} z 3. července 12 UTC, model GFS



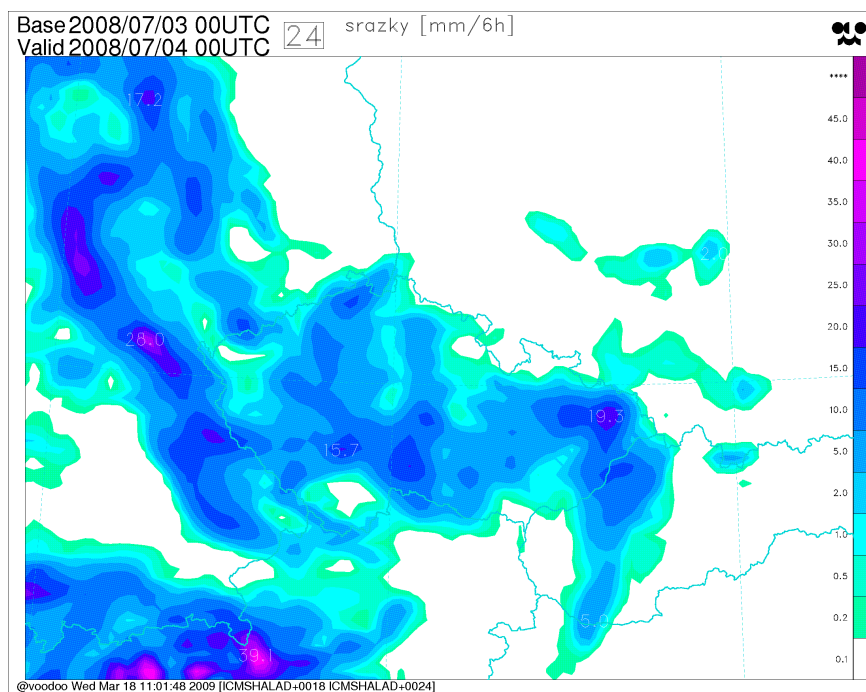
Obrázek 50: Předpověď hodnoty CAPE z globálního modelu ECMWF pro 3. červenec 18 UTC, běh modelu z 3. července 00 UTC



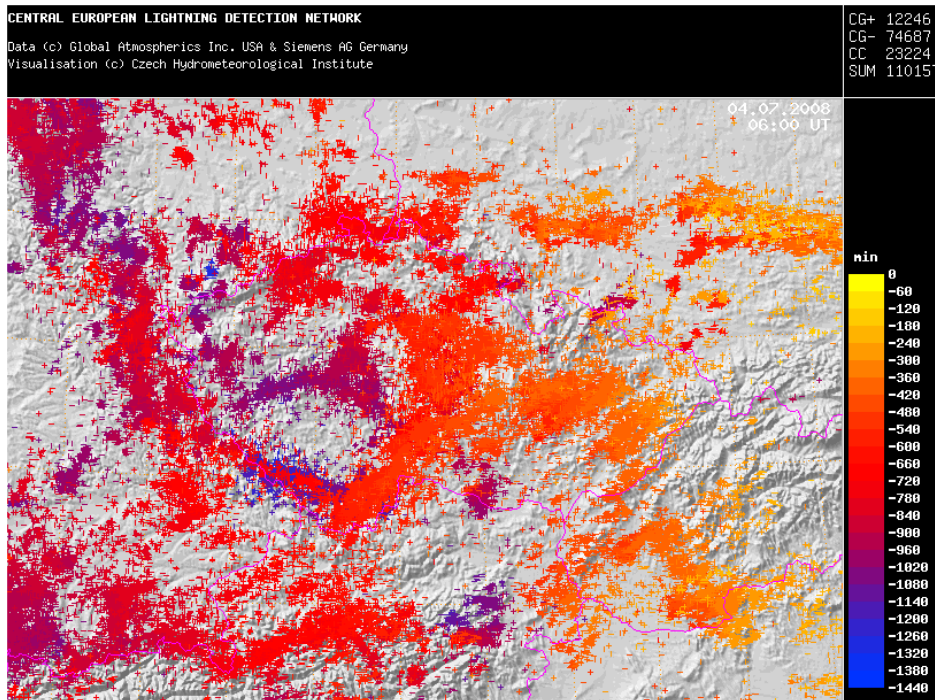
Obrázek 51: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek globálního modelu ECMWF pro 4. červenec 00 UTC, běh modelu z 3. července 00 UTC



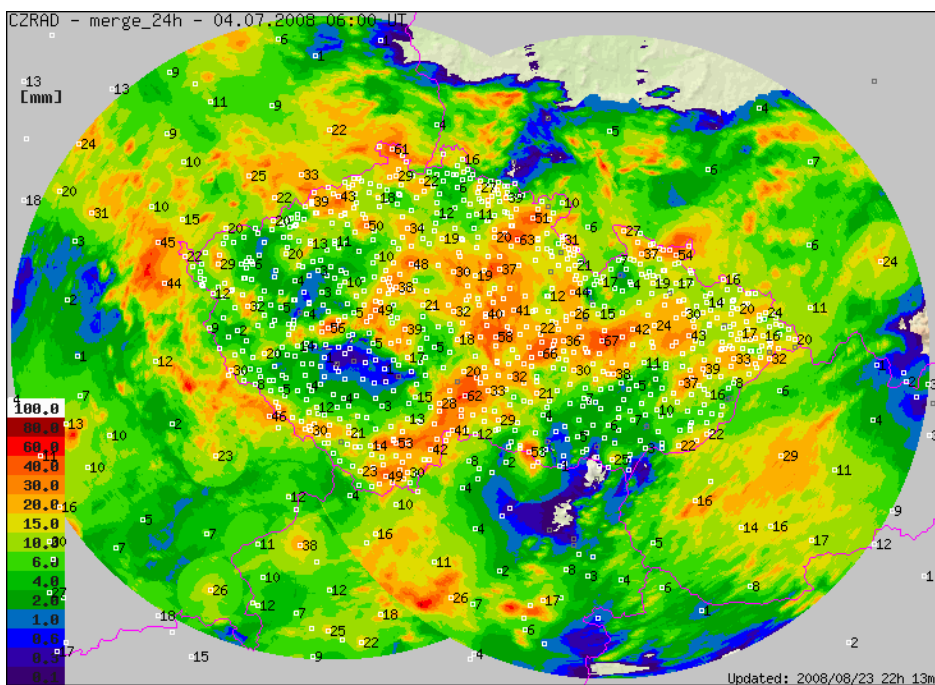
Obrázek 52: Předpověď hodnoty CAPE z lokálního modelu ALADIN pro 3. červenec 18 UTC



Obrázek 53: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek z lokálního modelu ALADIN pro 4. červenec 00 UTC

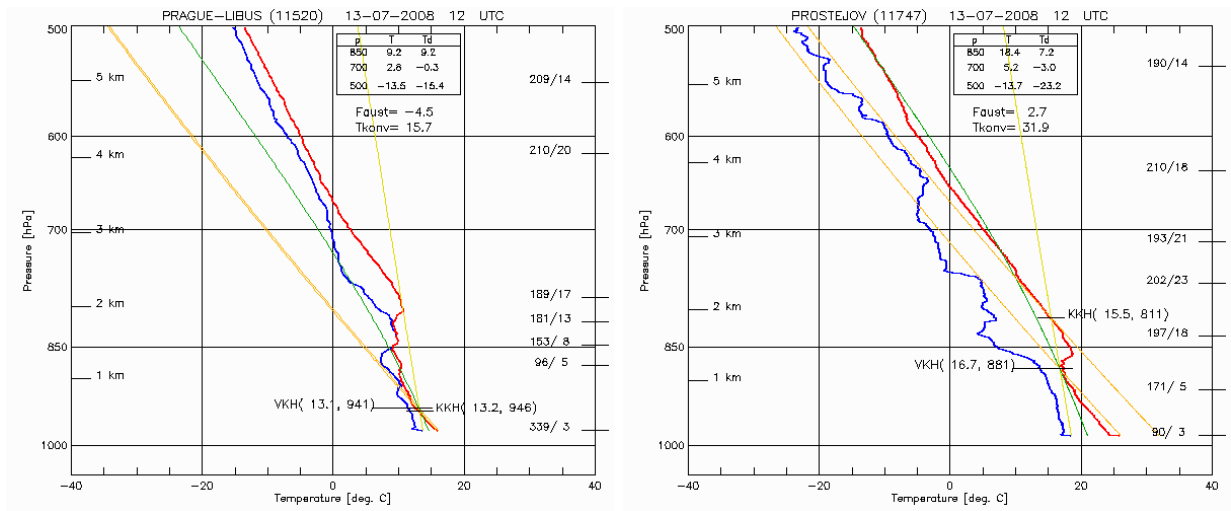


Obrázek 54: Suma bleskových výbojů za 3. 7. 2008

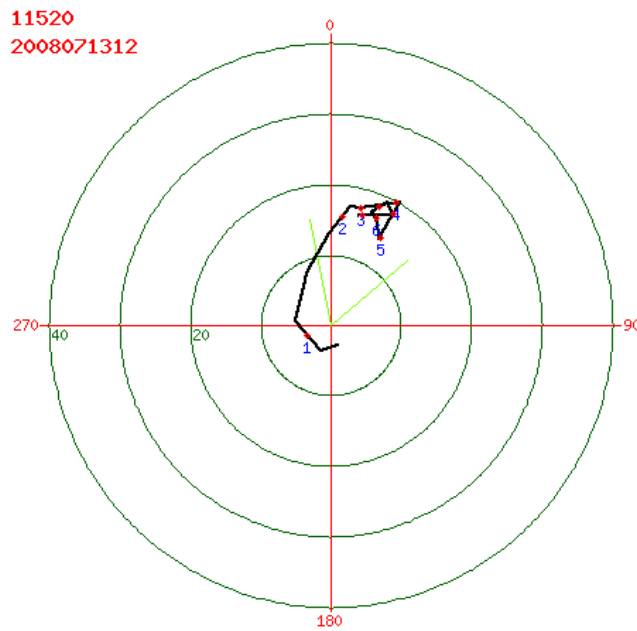


Obrázek 55: Celkový úhrn srážek za 3. 7. 2008, odhad srážek získaný kombinací adjustovaných radarových odhadů srážek a srážkoměrných údajů, tzv. MERGE

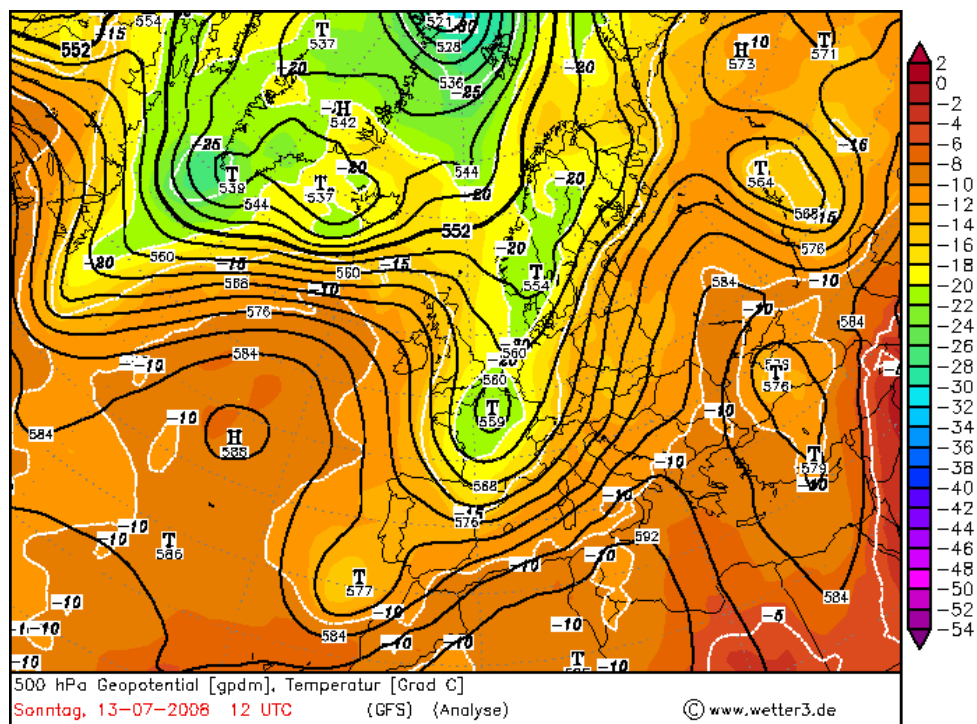
13. červenec 2008



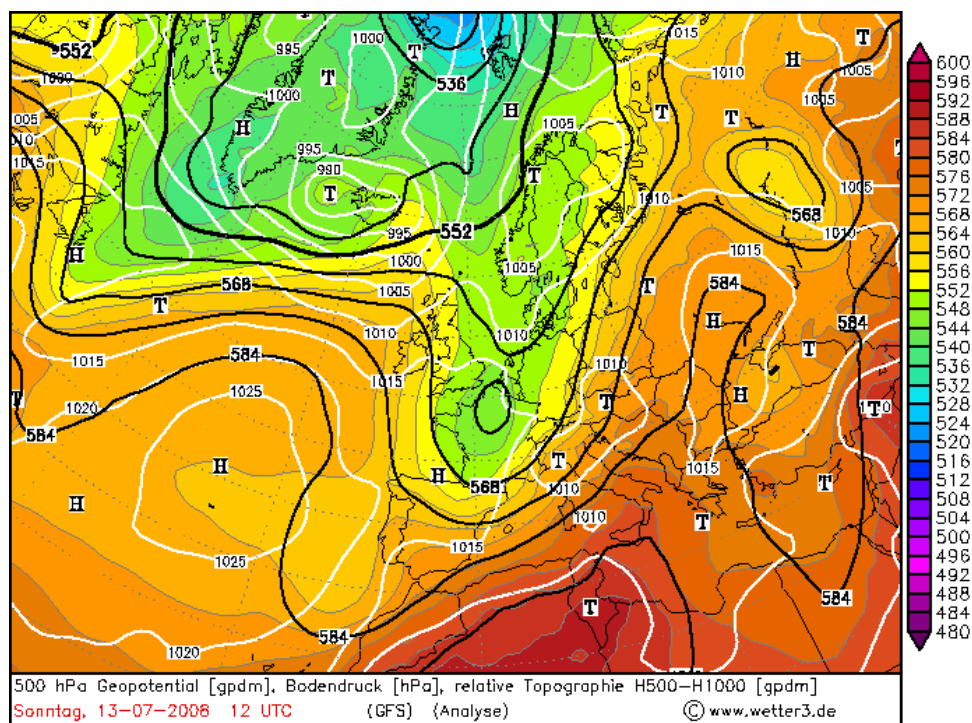
Obrázek 56: Aerologický výstup ze stanic Praha-Libuš a Prostějov ze dne 13. července 12 UTC.



Obrázek 57: Hodograf větru ze stanice Praha-Libuš 13. 7. 2008 12 UTC. Hodnota veličiny SREH je $349 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, stříh větru je roven $5,89 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

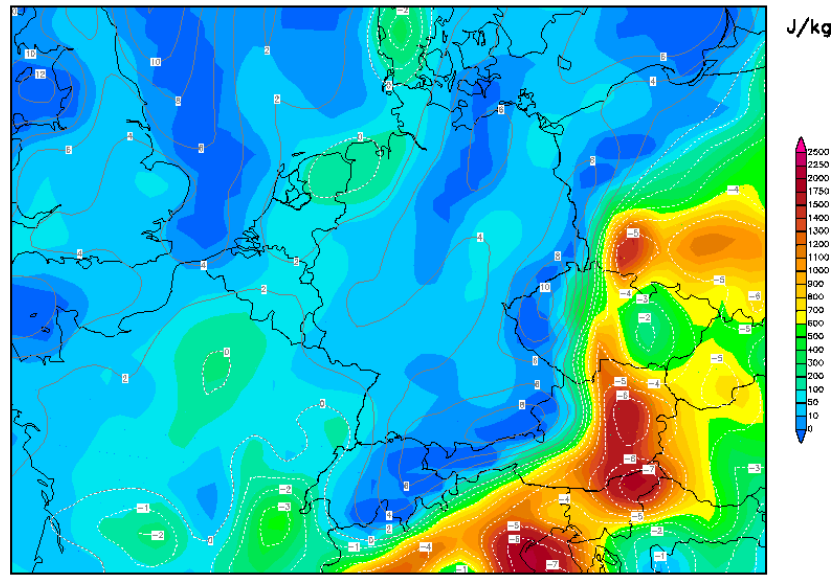


Obrázek 58: Hladina AT 500 hPa a teplota z 13. července 12 UTC, model GFS



Obrázek 59: Hladina AT 500 hPa, přízemní tlak a RT_{1000}^{500} z 13. července 12 UTC, model GFS

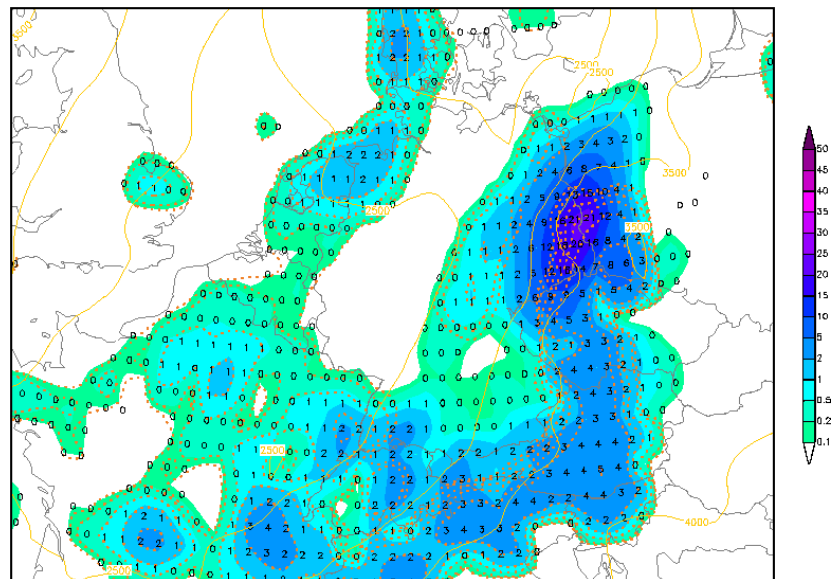
Init : Sun,13JUL2008 00Z Valid: Sun,13JUL2008 15Z
CAPE (J/kg) und Lifted Index (°C)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

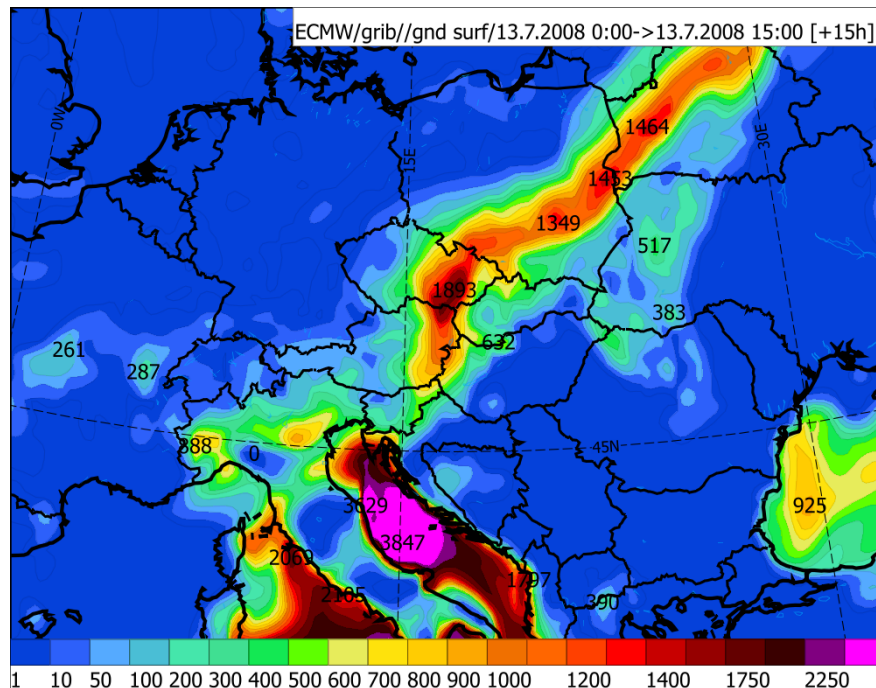
Obrázek 60: Předpověď hodnoty CAPE a LI z globálního modelu GFS pro 13. červenec 15 UTC, běh modelu z 13. července 00 UTC

Init : Sun,13JUL2008 00Z Valid: Sun,13JUL2008 15Z
3h-Nds in mm (rot=konvektiv) + 0°-Grenze in m

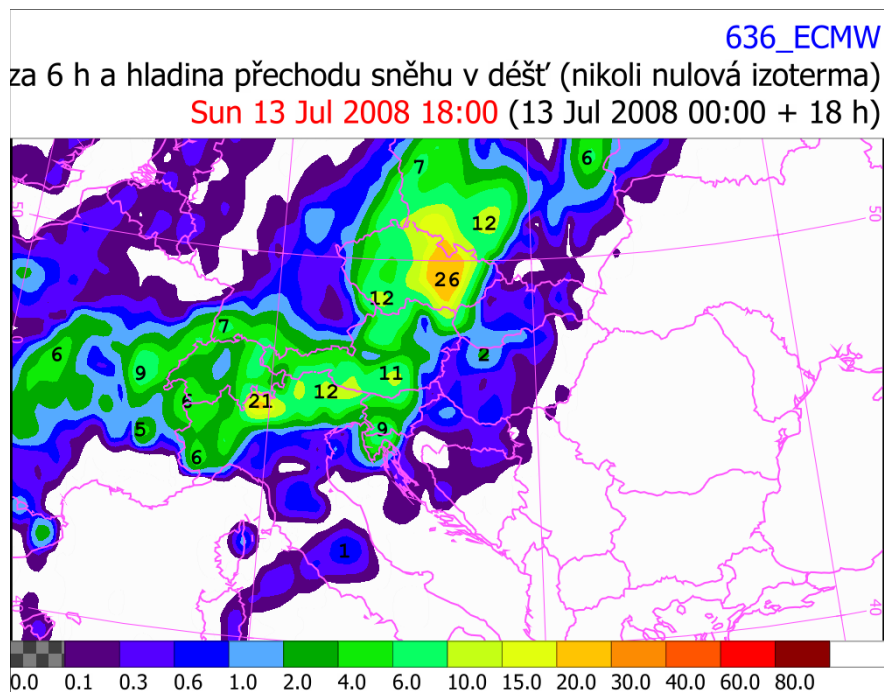


Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

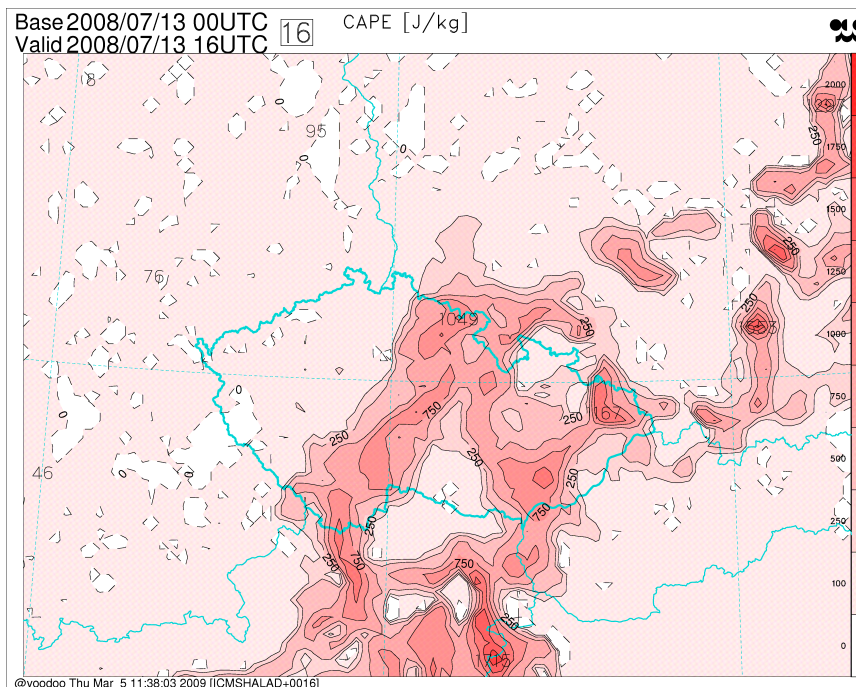
Obrázek 61: Předpověď tříhodinového úhrnu srážek z globálního modelu GFS pro 13. červenec 15 UTC, běh modelu z 13. července 00 UTC



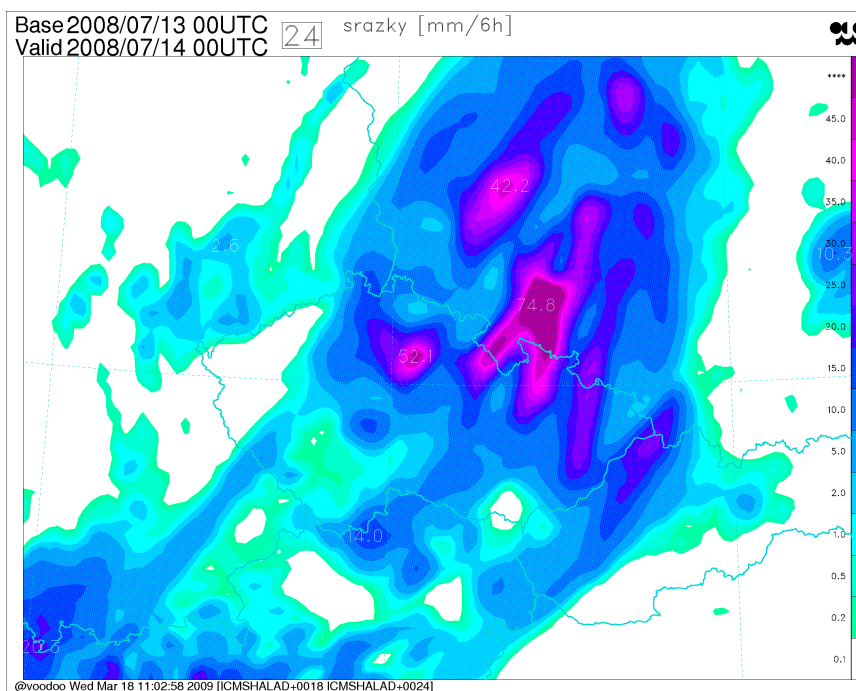
Obrázek 62: Předpověď hodnoty CAPE z globálního modelu ECMWF pro 13. červenec 15 UTC, běh modelu z 13. července 00 UTC



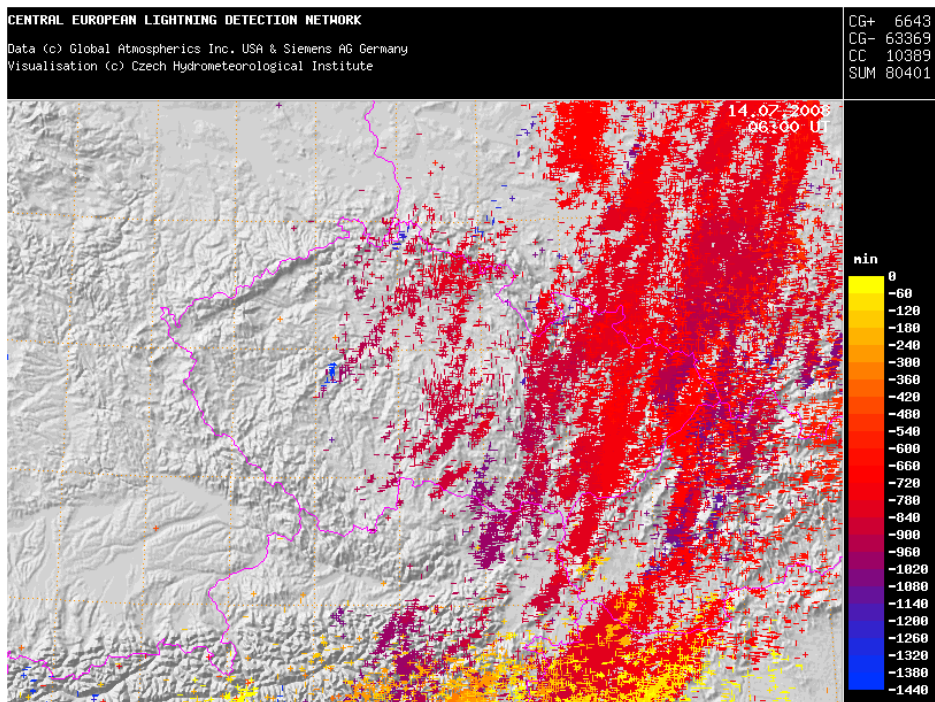
Obrázek 63: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek globálního modelu ECMWF pro 13. červenec 18 UTC, běh modelu z 13. července 00 UTC



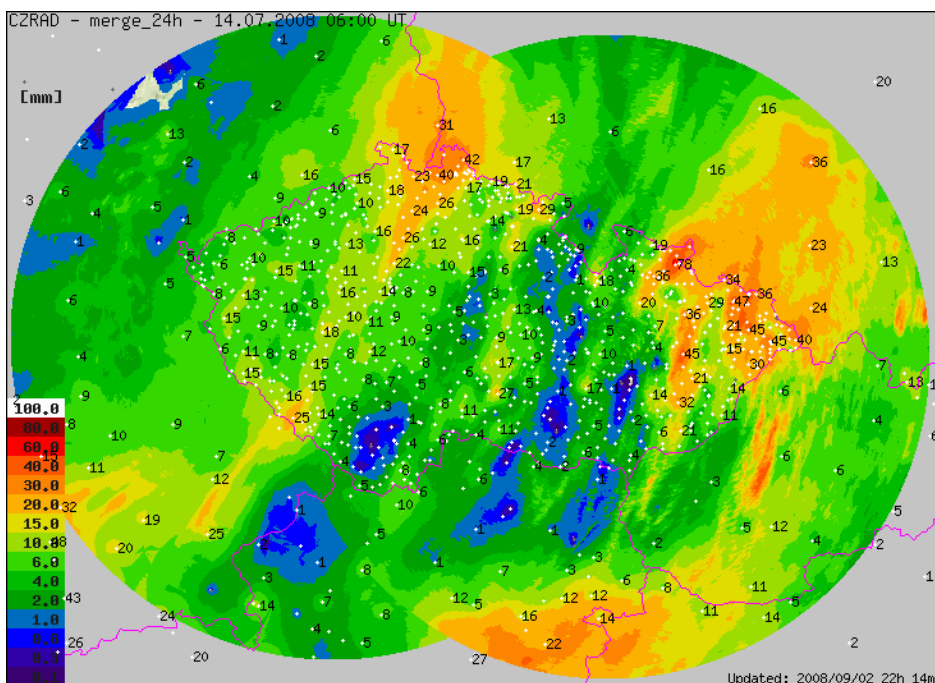
Obrázek 64: Předpověď hodnoty CAPE z lokálního modelu ALADIN pro 13. červenec 16 UTC



Obrázek 65: Předpověď šestihodinového úhrnu srážek z lokálního modelu ALADIN pro 14. červenec 00 UTC



Obrázek 66: Suma bleskových výbojů za 13. 7. 2008



Obrázek 67: Celkový úhrn srážek za 13. 7. 2008, odhad srážek získaný kombinací adjustovaných radarových odhadů srážek a srážkoměrných údajů, tzv. MERGE