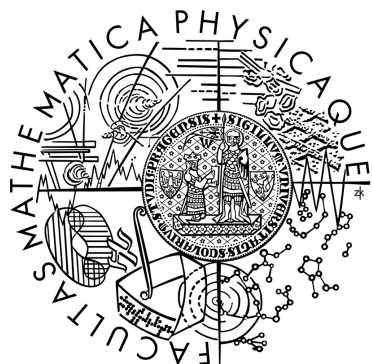


Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Lenka Crhová

### **Fén - nový pohled na klasický meteorologický jev**

Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Žák Ph.D.

Studijní program: Fyzika

2009

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu této bakalářské práce Mgr. Michalu Žákovi, Ph.D. za návrhy a pomoc při psaní této práce.

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

V Praze dne

Lenka Crhová

# Obsah

Úvod	v
<b>1 Klasický pohled na fén – termodynamická teorie fénu</b>	<b>1</b>
1.1 Historie výzkumu fénu, vznik klasické teorie . . . . .	1
1.2 Fyzikální princip klasické teorie . . . . .	3
<b>2 Nedořešené problémy a otázky teorie vzniku fénu</b>	<b>5</b>
2.1 Nevhodnost klasické teorie . . . . .	5
2.2 Pokles vzduchu na závětrné straně . . . . .	7
<b>3 Nejnovější poznatky-MAP</b>	<b>10</b>
3.1 „Shallow“ a „deep“ fén . . . . .	11
3.2 Hydraulická teorie . . . . .	11
3.3 Nestálost fénového proudění . . . . .	12
3.4 Problematika topografie . . . . .	13
<b>4 Předpověď a diagnostika fénu</b>	<b>15</b>
4.1 Problémy a vývoj předpovědi fénu . . . . .	15
4.2 Užití pomocných parametrů pro předpověď fénu . . . . .	17
4.3 Pravděpodobnostní předpověď intenzity fénu . . . . .	20
<b>5 Dopad fénu na společnost</b>	<b>21</b>
5.1 Nebezpečí spojená s fénovým větrem . . . . .	21
5.2 Ozón a znečištění . . . . .	22
5.3 Biologické účinky . . . . .	24
<b>Závěr</b>	<b>26</b>
<b>Literatura</b>	<b>28</b>

Název práce: Fén - nový pohled na klasický meteorologický jev  
Autor: Lenka Crhová  
Katedra (ústav): Katedra meteorologie a ochrany prostředí  
Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D.  
e-mail vedoucího: michal.zak@mff.cuni.cz

Abstrakt: Cílem předložené bakalářské práce je rešerše shrnující poznatky o meteorologickém jevu zvaném fén. Výzkum příčin vzniku a chování tohoto teplého závětrného větru je v popředí alpské meteorologie téměř 150 let, kdy se také vyvinula klasická termodynamická teorie vzniku fénu. V práci je shrnuta historie výzkumu fénu spolu s problematickým vývojem dnešní učebnicové teorie. Po seznámení s fyzikálními principy klasické teorie je poukázáno na pozorované případy fénových epizod, při kterých tato teorie selhává a fénové proudění musí být vysvětleno pomocí jiných teorií. V dnešní době nastává rychlý rozvoj v numerickém modelování atmosféry a v metodách měření, což samozřejmě umožňuje nové výzkumy přinášející nové důležité poznatky. Proto je v práci také věnována pozornost nejnovějším výzkumům současných otázek týkajících se fénového větru, jako je jeho silná topografická závislost, jeho předpověď a vliv na společnost.

Klíčová slova: Fén, klasická teorie, MAP

Title: Phoen - new view of classic meteorological phenomena  
Author: Lenka Crhová  
Department: Název katedry či ústavu v angličtině  
Supervisor: Mgr. Michal Žák, Ph.D.  
Supervisor's e-mail address: michal.zak@mff.cuni.cz

Abstract: The goal of this bachelor thesis is summary of research findings about meteorologic phenomenon called foehn. Research of origin and behaviour of this warm lee wind has been a priority of Alpine meteorology almost for 150 years, when the classical thermodynamics theory was evolved. In this paper there is summarized history of foehn research with questionable development today's textbook theory. After discussion of physical principles of classical theory in the work there is mentioned observed foehn cases in which the mechanism of classical theory can't be applied and foehn wind have to be interpreted by other theories. Nowadays great development of numerical modeling of atmosphere and mesurments methods occur. This make possible new investigations which brings new important findings. Thus the work is also focused on actual investigations and issues related foehn, such as strong topographical relation, foehn forecasting or its impact on society.

Keywords: Foehn, Classical theory, MAP

# Úvod

Definice fénu dle Světové meteorologické organizace (WMO) z roku 1992 zní: „Fén je vítr obecně vanoucí na závětrné straně hor, který je sestupem oteplován a vysoušen“ (citováno z [2]). Tedy fénem je nazýván teplý suchý „padavý“ vítr, který vzniká při proudění vzduchu přes pohoří.

Označení fén vzniklo v alpských oblastech, které jsou typickým místem výskytu fénového větru. V Alpách tento jev běžně nastává při jihovýchodním, jižním a jihozápadním proudění. Zde je teplotní efekt navíc zvýšen tím, že vzduchové hmoty přicházejí z teplých vlhkých oblastí Středomoří. V Alpách se fén vyskytuje nejvíce na jaře, někdy i v zimě a na podzim, v létě jen zřídka.

Fénový vítr není ale specifický pouze pro Alpy, můžeme se s ním setkat i v mnoha jiných světových pohořích, kde bývá často nazýván vlastními místními názvy. Je znám například z Pyrenejí, Karpat, Sibiře, ale dokonce i z českých pohraničních hor nebo ze slovenských Tater. Ve Velké Británii je tento jev nazýván „helm wind“. V Severní Americe je vítr fénového charakteru nazýván „chinook“, vane především v zimě a z jara na východním úbočí Skalnatých hor v USA a způsobuje oteplování v podhorských krajích ve státech Montana, Wyoming, Severní a Jižní Dakota. Američané tento jev také někdy označují výstižným názvem „polykač sněhu“. V Andách bývá označován slovy „puelche“ a „zonda“, v japonských horách „yamaji-kaze“. Fén se vyskytuje i na Novém Zélandu nebo západním pobřeží Grónska, kde na jaře může způsobit vzestup teploty nad 0°C.

Jeho výzkum je jedním z tradičních témat alpské meteorologie již téměř 150 let, neboť důsledky tohoto meteorologického jevu mají v fénových údolích významný dopad na zdejší klima a životy zdejších obyvatel. O tom, že jeho důsledky mohou být jak kladné tak záporné a někdy dokonce až tragické, se blíže zmiňuje kapitola 5.

Tato práce by především měla přinést ucelený pohled na fénové proudění od počátku jeho výzkumu až po současné poznatky. V první kapitole se seznámíme s klasickou termodynamickou teorií vzniku fénu a historií jejího problematického vývoje. Tato teorie bývá téměř vždy uvedena jako jediné vysvětlení vzniku fénu ve všech učebnicích meteorologie. Toto vysvětlení, staré více než 140 let, se však ukázalo již v první polovině 20. století jako nedostačující. Byly a jsou pozorovány případy fénu, které výše uvedená teorie není schopna vysvětlit. Proto je kapitola 2 věnována případům fénu, které nemohly vzniknout dle klasického mechanismu, a dalším teoriím vzniku fénového větru, které jsou známy již méně a v české literatuře se nevyskytují vůbec. S fénem jsou spojeny stále nedořešené otázky, proto jsou i v poslední době prováděna pozorování a měření pro lepší porozumění a vysvětlení

tohoto jevu. Nejnovější výzkumy MAP (Mesoscale Apline Programme) jsou shrnuty v kapitole 3. Další aktuální poznatky týkající se předpovědi fénu či jeho biologických účinků jsou uvedeny v kapitolách 4 a 5.

# Kapitola 1

## Klasický pohled na fén – termodynamická teorie fénu

Tato teorie vzniku fénu, často nazývána učebnicovou teorií, spolu s podobným obrázkem, jako je obrázek 1.2, je rozšířena mezi širokou veřejností. Bývá často uváděna jako jediné vysvětlení vzniku tohoto jevu nejen v populárních publikacích, ale dokonce i téměř ve všech meteorologických učebnicích, aniž by bylo zmíněno, že jde pouze o jeden z mnoha způsobů, jak fén může vzniknout. Proto bývá často mylně považována za jediný možný způsob vzniku fénu. Za jejího autora bývá nesprávně, jak vyplývá z následujícího textu, udáván Julius Hann.

### 1.1 Historie výzkumu fénu, vznik klasické teorie

Fén, především jižní fén v Alpách, je klasickým tématem v historii meteorologických výzkumů. Jelikož při jižním fénu obvykle na závětrné straně nastává výrazné zvýšení teploty, byla od samého počátku vědeckého výzkumu fénu v popředí otázka původu tohoto „tepla“.

Nejprve se tato okolnost vysvětlovala advektivními procesy z rovníkových oblastí. Wild, přední švýcarský meteorolog 19. století, se domníval, že původ fénového proudění je na Sahare. Významný německý meteorolog Heinrich Wilhelm Dove zase zastával názor, že původ fénu je v západní Indii.

V polovině 19. století diskuse významných vědců vedly ke schválení tzv. „termodynamické teorie fénu“, která je dnes běžně připisována Juliu Hannovi. Přesvědčit své vědecké kolegy se mu podařilo teprve poté, co byl fénový vítr detekován i v Grónsku, neboť zde již není možné vysvětlit původ teplého větru přenosem tepla ze subtropů. Obecně se má za to, že Hannova teorie je dnešní učebnicovou teorií, která je v současné době spolu se svým klasickým schématem, tj. obrázek jednoho kopce s výstupem vzduchu, kondenzací a srážkami na návětrné straně a závětrným suchým klesáním, uváděna ve všech meteorologických učebnicích a ve většině z nich i jako jediná teorie vzniku fénu (viz obrázek 1.2).

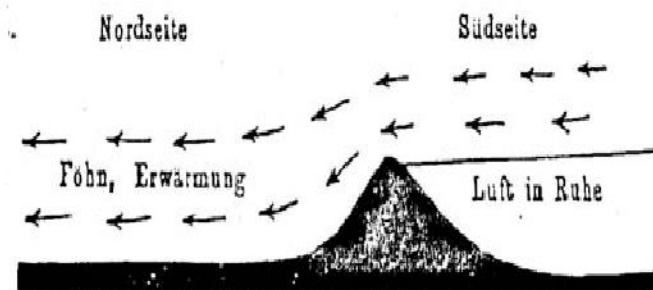
Petra Seibert ve své publikaci [8] ale prokázal, že Hannova teorie byla ve skutečnosti trochu jiná a jeho vysvětlení bylo během první poloviny 20. století značně

pozměněno. Hannova oroginální teorie je znázorněna na obrázku 1.1.

Ve skutečnosti (dle [8]) roku 1866 Julius Hann poprvé publikoval článek o původu fénu, kde suchost klasajícího vzduchu vysvětlil jako následek oteplování adiabatickou kompresí. Stále však akceptoval teorii Dova, že vzduch přichází z rovníkových oblastí. Hann také upozorňoval, že nezávisle na něm se stejný pohled objevil již u Wilda a v USA u Jamese Espy.

Roku 1901 vyšlo první vydání Hannovy známé učebnice „Lehrbuch der Meteorologie“, kde uvádí svoji termodynamickou teorii fénu.

Hann prezentoval, že se skutečně vyskytují případy, kdy oteplení vzduchu je způsobeno uvolněným kondenzačním teplem na návětrné straně a že většina dlouhých fénových period v zimě a na podzim má tento původ. Avšak dodal, že toto není jediná a absolutní podmínka pro vznik fénu. Uvedl, že mnoho fénových případů vzniká pouze díky adiabatickému oteplování klesajícího vzduchu do fénového údolí. Díky tomu, že změna teploty vzduchu s výškou je téměř vždy tak malá, a to zvláště za klidného počasí, které fénu často předchází, pak pouhé klesání vzduchu z velké výšky alpských vrcholů stačí, aby vznikl dostatečně teplý a suchý fén.



Obrázek 1.1: Hannův náčrtek (převzato z [7])

Až roku 1943 přichází Ficker a De Rudder s novým principem, který je znám z dnešních učebnic. Tento princip je charakterizován profilem proudění, který je symetrický mezi jihem a severem a proudnice opisují topografii. Kondenzace vlhkého vzduchu během výstupu zde hraje zásadní roli pro vysvětlení teplotních rozdílů mezi severní a jižní stranou. Ovšem v jejich pracích úloha různých skupenství vody není často dostatečně dobře uvážena. Jejich prezentace ignoruje např. fakt, že ne všechna zkondenzovaná vlhkost je odnesena srážkami a některé oblaky jsou přeneseny přes vrchol, a tudíž sestup nemůže ihned začínat suchoadiabaticky. Navíc se zde tvrdí, že fén je vždy spojen s oblačností a srážkami na jihu, což je v přímém rozporu s tím, co psal Hann. Je tedy ironie, že se tento pohled na vznik fénu později dostal do Hannovy učebnice. Tento styl prezentace se rozšířil velice rychle do dalších učebnic a mezi širokou veřejnost. Vznikla tak dodnes užívaná učebnicová teorie fénu, která bývá mylně připisovaná Hannovi.

Ale již v této době se vědci se znalostí dynamické meteorologie nechtyli do této pasti. Pravděpodobně si byli vědomi základních principů proudění vzduchu přes po-



hoří, které je ve stabilním prostředí charakterizováno asymetrickými profily. Již roku 1920 Luise Lammert, jedna z prvních žen v meteorologii, sestavila tří-dimensionální model proudnic z pilotovaných balonových observatoří, které také ukazují, že proudění při fénu normálně nekopíruje reliéf jižních Alp.

## 1.2 Fyzikální princip klasické teorie

Dochází-li k proudění vzduchu přes pohoří, je vzduch na návětrné straně horské překážky nucen stoupat vzhůru. Protože vzduchová částice si během svého vertikálního pohybu v atmosféře zpravidla nijak významně nestačí vyměňovat teplo s okolím, lze celý proces výstupu považovat za adiabatický. Tedy vystupující vzduch se adiabatickým rozpínáním ochlazuje.

Dosažením diferenciálního tvaru stavové rovnice 1.2 do první hlavní věty termodynamiky 1.1:

$$dq = c_v dT + p d\alpha \quad (1.1)$$

$$p d\alpha = R dT - \alpha dp \quad (1.2)$$

získáme vztah pro  $dq$ :

$$dq = (c_v + R) dT - \alpha dp, \quad (1.3)$$

kde  $\alpha$  je měrný objem,  $c_v$  měrná tepelná kapacita při konstantním objemu. Pro  $dq = 0$  užitím Moyerova vztahu  $c_p = c_v + R$  a rovnice hydrostatické rovnováhy

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho \quad (1.4)$$

lze odvodit, že teplota vzduchu se s výškou mění dle vztahu:

$$\gamma_d = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p}, \quad (1.5)$$

kde  $\gamma_d$  nazýváme suchoadiabatickým gradientem,  $g$  je tíhové zrychlení a  $c_p$  měrná tepelná kapacita vzduchu při stálém tlaku. Vyčíslíme-li tuto rovnici pro známé hodnoty  $g = 9,81 m s^{-2}$  a  $c_p = 1004 J kg^{-1} K^{-1}$ , dostaneme, že  $\gamma_d \approx 1 \cdot 10^{-2} K m^{-1}$ , tedy že teplota stoupající vzduchové hmoty klesá asi o jeden K ( $^{\circ}C$ ) na  $100m$ . Podobně odvozeno v [1].

Ale je-li vystupující vzduch vlhký, ochlazuje se suchoadiabaticky pouze do jisté výšky, tzv. kondenzační hladiny, kde stoupající vzduchová hmota dosáhne teploty

rosného bodu a vodní pára začíná kondenzovat. Po dosažení tohoto stavu nasycení je však situace již komplikovanější. Pro odvození nasyceně adiabatického gradientu je třeba při aplikaci první hlavní věty termodynamické uvažovat i latentní teplo, které se uvolňuje při kondenzaci vodní páry a zpomaluje tak ve vystupující vzduchové hmotě pokles teploty. Zavedeme-li pro nasycený vzduch obdobně jako pro suchý nasyceněadiabatický gradient teploty

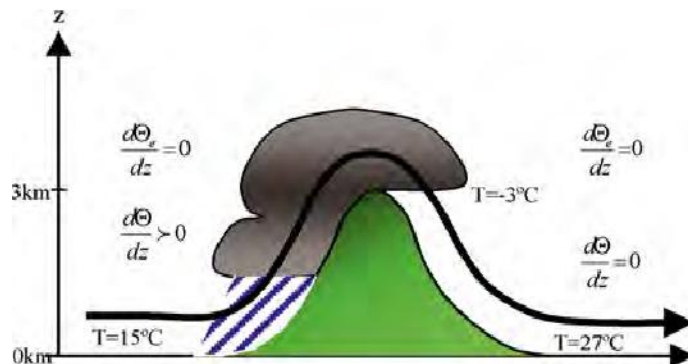
$$\gamma_w = -\frac{dT}{dz}, \quad (1.6)$$

potom termodynamické výpočty ukazují, že hodnoty nasyceně adiabatického gradientu  $\gamma_w$  se zpravidla značně odlišují od suchoadiabatického  $\gamma_d$ . V oboru nejčastěji se vyskytujících meteorologických teplot uvažujeme hodnotu  $\gamma_w \approx 0,6 \cdot 10^{-2} K m^{-1}$ , tedy teplota klesá díky uvolňování latentního tepla méně než doposud a to asi o  $0,6^\circ C$  na  $100m$  výstupu.

Nad pohořím se proto v této výšce začne vytvářet oblačnost, často nazývaná fénová zeď, z které vpadávají srážky. Převážná část vodní páry původního vlhkého vzduchu tak zůstává na návětrné straně ve formě oblačných kapek nebo padajících srážek. Sestupující vzduch na závětrné straně se potom již klesáním otepluje pouze suchoadiabaticky, tj. s každými  $100m$  poklesu asi o  $1^\circ C$ . Tedy dochází k relativnímu oteplení proudícího vzduchu.

Celý výše popsaný proces je znázorněn na obrázku 1.2, kde je také uveden příklad konkrétních hodnot teploty na návětrné a závětrné straně. Je zde uveden extrémní případ vzrůstu teploty, kdy je pro výpočet uvažován nasyceně adiabatický výstup již od úpatí hory po celé  $3km$  na obrázku naznačené výšky hory a suchoadiabatický setup na závětrné straně. Tedy dle výše uvedené teorie lze jednoduchým matematickým výpočtem zjistit, že rozdíl teploty  $\Delta T$  proudícího vzduchu na návětrné a závětrné straně činí:

$$\Delta T = h(\gamma_d - \gamma_w) = 12^\circ C$$



Obrázek 1.2: Schéma klasické teorie (převzato z [6])

# Kapitola 2

## Nedořešené problémy a otázky teorie vzniku fénu

### 2.1 Nevhodnost klasické teorie

V současné době je zřejmé, že existuje spousta případů fénu spojených s jevy, které nelze dostatečně vysvětlit klasickou teorií. Například již mnohokrát byla pozorována silná fénová epizoda, aniž by docházelo k významným srážkám na návětrné straně. Klasická teorie také nevysvětluje vysoké rychlosti větru v oblastech vrcholků hor a závětrných údolích atd.

Rakouští vědci stále prozkoumávali platnost této učebnicové teorie, ale dle [7] byla poprvé opravdu napadena roku 1978 Scorerem, který ve své knize „Environmental Aerodynamics“ uvádí přinejmenším dvě vysvětlení pro oteplení vzduchu, která nevyžadují kondenzaci vodní páry na návětrné straně pohoří. Zaprvé je to mechanické promíchávání stabilně rozvrstvených vzduchových mas, čímž se nižší vrstvy oteplují a vyšší ochlazují. Důležitější je však hlavně druhý případ, kdy dochází ke klesání potenciálně teplejšího vzduchu na závětrné straně.

Dále jsou shrnuty některé případy, které nelze vysvětlit učebnicovým schématem, a jiné možné teorie vzniku fénového proudění:

- Již Hann díky pozornému sledování údajů pro fén na obou stranách Alp zjistil, že současně s jižním fénem se nemusí na návětrné straně vyskytovat dešťové srážky. To značí jasný nedostatek pro učebnicovou teorii, kde kondenzace a srážky na návětrné straně představují klíčový bod pro vznik fénového větru.

Vysvětlení vzniku tohoto typu fénu plyne z původní Hannovy teorie. Tedy že vzduch z vrstev nad pohořím přes pohoří jednoduše přechází a až za ním následně klesá dolů (viz obrázek 1.1). Při sestupu se vzduch adiabaticky ohřívá a k zemi se tak dostane vzduch teplejší, než zde byl doposud. Jelikož za klidného počasí, které fénu často předchází, bývá pokles teploty vzduchu s výškou dostatečně malý, pouhý pokles vzduchu z velké výšky alpských vrcholků stačí na to, aby udělil dostatečné oteplení a suchost fénovému vzduchu.

Analýza dat získaných během a po ALPEX (Alpine Experiment) jasně po-

tvrdí, že minimálně v rakouském relativně nízkém Brennerském průsmyku se současně s jižním fénem dešťové srážky objevují v méně než 50% případů, tedy dochází zde k tomuto sestupu vzduchu při většině fénových epizod.

Právě skutečnost, že většina výzkumů fénu v Rakousku byla prováděna pro Brennerský průsmyk vysvětluje, proč zde byla platnost klasické teorie tolik diskutována již dříve. Přesto se tento typ fénu (často nazývaný rakouský typ) v učebnicích téměř nevyskytuje, ikdyž je známý již přes sto let a lze jím vysvětlit podstatné procento fénového oteplování.

Ve skutečnosti v mnoha případech existují kombinace obou typů, hlavní oteplování lze přičíst tomuto mechanismu. Dešťové srážky jako malý dodatečný příspěvek dodává mechanismus popsany klasickou teorií.

- Také jsou známy případy, kdy byl fén pozorován na obou stranách pohoří současně, což opět nelze vysvětlit mechanismem klasické teorie.

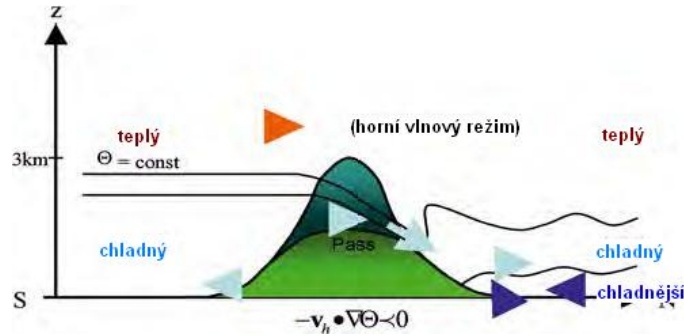
Tyto případy lze vysvětlit poklesem velké vzduchové masy na vrchol pohoří, která pak klesá do údolí po obou stranách.

- Dnes se také stále častěji objevují teorie, že fén je pouze „**maskovaná bóra**“. Bóra je známá především z jadranského pobřeží. Jde o další druh větru související s přetékáním vzduchu přes horskou překážku. Pokud pás pohoří brání postupu velmi chladné (tedy i těžké) vzduchové hmoty, začne se tento chladný vzduch hromadit na návětrné straně pohoří. Zde se kupí tak dlouho, dokud nedosáhne vrcholku hory a nepřeteče přes něj. Často se ještě dříve provalí horskými sedly nebo průsmyky. V závětrí pak nastává období chladného větru a prudký pokles teploty.

Na první pohled se může zdát, že jde tedy o naprostý opak fénu. Ale jak je znázorněno na obrázku 2.1, může nastat případ, kdy proudící vzduch je sice chladný, chladnější než okolní vzduch atmosféry, ale na závětrné straně hor se u zemského povrchu vyskytuje oblast ještě chladnějšího vzduchu. Když potom dojde k přetečení vzduchu do závětrí a od fouknutí tohoto studeného vzduchu, může zde nastat relativní oteplení.

Během MAP (Mesoscale Alpine Program) bylo prostřednictvím tří-dimenzionálních modelů a větrného pole, a to jak v údolí řeky Wipp tak i v údolí Rýna, jasně prokázáno, že fén v nižších vrstvách může mít hydraulický charakter (více v kapitole 3.2). To potvrzuje teorii „maskované bóry“, neboť hydraulicky se může chovat pouze poměrně hustá tekutina tedy chladnější vzduch. Tím je i definice fénu jako „teplý závětrný vítr“ zavádějící. A spíše než o fén se zde tedy jedná skutečně o bóru.

- Dále se v Alpách může vyskytnout netypický druh fénového větru a to tzv. „**Dimmerfoehn**“ (nejasný, temný). Tento název vystihuje nepřítomnost slunečního svítu i na závětrné straně. Jdou-li přes vrcholky Alp extrémní tlakové difference, srážkové mraky z návětrí se mohou dostat i přes vrcholek hor daleko na závětrnou stranu. Potom i za pohořím může pršet a vzduch zde může být poměrně klidný.



Obrázek 2.1: Teorie „maskované bóry“ (převzato z [6])

Fénový vítr tedy nevané ihned za pohořím, ale může dosáhnout povrchu až několik kilometrů za ním. Když se pak dotkne země, nastává zpravidla velmi silná větrná bouře. Tento typ fénu je ale velice vzácný. Je také často spojen s nánosy saharského prachu do Alp.

Je tedy patrné, že vedle klasické teorie je třeba uvažovat i jiné způsoby vzniku fénového větru. Ale na druhé straně nelze učebnicovou teorii zavrhnout úplně. Pozorování jasně ukazuje, že na návětrné straně vysokých horských komplexů se během fénu často objevují silné srážky. Například na jihu pohoří Gotthard naměřené závislosti teploty, vlhkosti a větru na čase při fénu jasně ukázaly, že zde platí učebnicová teorie.

Během ALPEX se ověřovala teorie, že případy fénu kopírující klasickou teorii jsou častější pro vyšší pohoří (např. Gotthard) než pro nižší (Brennerský průsmyk). Ale tento předpoklad se během ALPEX nepodařilo ověřit žádnou statistickou analýzou. Nepodařilo se tedy udělat žádný konečný závěr.

## 2.2 Pokles vzduchu na závětrné straně

Po roce 1900 již patřila znalost termodynamického charakteru fénového procesu k obecným meteorologickým poznatkům. Proto do popředí vystoupila otázka: Proč vzduch na závětrné straně klesá dolů do údolí a nezůstává jednoduše ve své výškové hladině?

Toto chování se na první pohled zdá nepochopitelné tím spíše, že ve většině případů fénu je potenciální teplota vzduchu, který přešel přes pohoří, vyšší než teplota původního vzduchu závětrné strany, tedy vzduch je zde rozvrstven stabilně.

Proto na toto téma bylo vypracováno mnoho teorií. Dále (dle [6]) je uvedena většina prací na toto téma z první poloviny minulého století:

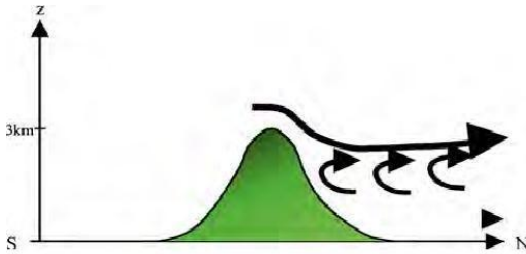
- **Teorie vertikální aspirace** (Streiff-Becker 1931).

Základ této myšlenky se objevil již kolem roku 1870 u Wilda. V této teorii se předpokládá, že výškové proudění leží nad potenciálně chladnějším vzduchem. Ten se postupně prostřednictvím silné turbulence vzdaluje od překážky, takže

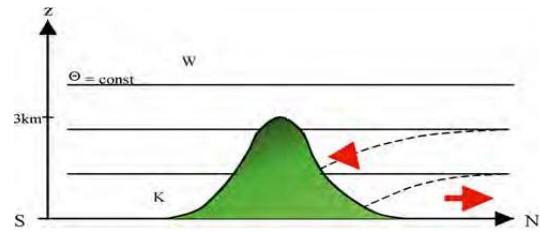
teplý vzduch z výšky postupně proniká až na zem, jak je zobrazeno na obrázku 2.2.

- **Teorie horizontální aspirace** („kompenzující proudění“) (Ficker 1931).

S podobnou myšlenkou také přišel již před rokem 1900 Willer Bill. Tato teorie říká, že studený přízemní vzduch je odsáván prostřednictvím blízkí se tlakové níže. Tím se postupně k zemi dostává potenciálně teplejší vzduch. Schéma této teorie je uvedeno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.2: Teorie vertikální aspirace (převzato z [6])



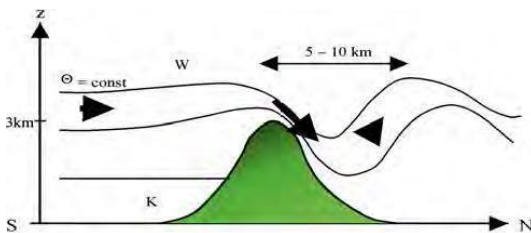
Obrázek 2.3: Teorie horizontální aspirace (převzato z [6])

- **Teorie závětrných vln**

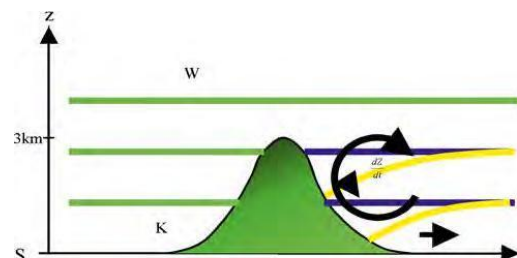
Tato teorie byla prvně použita Lyrem v roce 1940 pro popis horských proudů. Při fénu jsou velmi často vytvářeny vlny. Sestupný pohyb vzduchu v závětrí může být proto vysvětlen jako nucené vychýlení vzduchu z rovnovážného stavu při přechodu přes horskou překážku, jak je uvedeno na obrázku 2.4. Proto se tento proces také označuje jako vynucený závětrný sestup.

- **Solenoidální teorie** (Frey 1944).

Předpokládá se, že v hornaté oblasti se vytváří solenoidové pole izobar-izentrop, tudíž se dle zákona cirkulace proudění vzduchu zrychluje. Jak je ale vidět na obrázku 2.5. Zrychlení oběhu zde má však opačný smysl než fénové proudění. Frey ukázal, že v závětrí Alp je sklon izentrop opačný než je uvedeno na obrázku, pak má i zrychlení správný směr.



Obrázek 2.4: Teorie závětrných vln (převzato z [6])



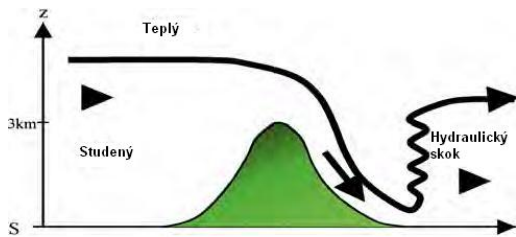
Obrázek 2.5: Solenoidální teorie (převzato z [6])

- **Teorie hydraulického skoku** (Schweiser 1953)

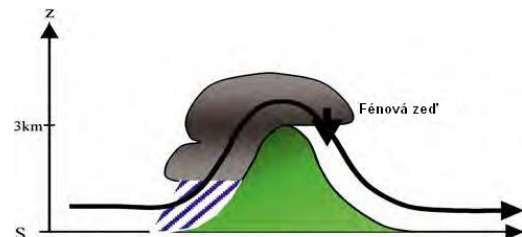
Schweiser přirovnal chování nízkého troposférického fénové proudění v závětrí k slabému vodnímu proudění přes překážku. Pokles vzduchu v závětrí pak vykládá jako proudění s možností hydraulického skoku, který se při fénu opravdu může vyskytnout (obrázek 2.6).

- **„Waterfall“ teorie** (Rossmann po roce 1950).

Zde je sestupný pohyb vysvětlen tím, že vzduch na hranici fénu je chladnější a má tedy vyšší hustotu než závětrný vzduch. Tím vzniká na závětrné straně zrychlení fénového vzduchu směrem dolů (obrázek 2.7).



Obrázek 2.6: Teorie hydraulického skoku (převzato z [6])



Obrázek 2.7: „Waterfall“ teorie (převzato z [6])

Dnes se předpokládá, že neexistuje žádná obecně aplikovatelná teorie sestupu vzduchu.

Klemp a Lilly (1975) provedli detailní analýzu silného sestupného větru vzniklého díky závětrným vlnám, které se mohou objevit při fénu. Uvádějí, že pozorovaný sestup může nastat pouze za jistých ostře limitovaných podmínek.

A proto v závislosti na vlhkosti, teplotě a větrném profilu mohou být různé mechanismy zodpovědné za sestupné proudění. Jde tedy vždy o jeden a ten samý děj, který ale nastává za různých podmínek.

Zdá se tedy, že stejně jako k vysvětlení vzniku fénu tak i k vysvětlení tohoto sestupného pohybu vzduchových mas do závětrí neexistuje pouze jedno univerzální vysvětlení, ale je nejspíše potřeba celá řada fyzikálních mechanismů.

# Kapitola 3

## Nejnovější poznatky-MAP

Přestože je fén v popředí meteorologických výzkumů již přes sto let, stále existuje celá řada nedořešených otázek s ním spojených. Mezi ně například patří silná topografická závislost fénového proudění či jeho velká neustálenost, tj. nastávání fénových pauz. Také se samozřejmě usiluje o předpovídání fénu, které stále není zcela dořešeným problémem.

Aby fénu bylo lépe porozuměno, aby mohlo být vysvětleno nelineární proudění vzduchu přes Alpy pomocí numerických simulací a aby mohly být modely srovnány s realitou, je třeba získat dostatek naměřených dat z horských regionů. Proto v minulosti i v současnosti proběhlo několik tzv. „polních“ experimentů. Roku 1982 vrcholil mezinárodní výzkum ALPEX (Alpine experiment), který se mimo jiné věnoval dokumentování tohoto jevu pro Alpy. Obdobný experiment PYREX byl proveden v Pyrenejích.

Od roku 1999 probíhá hlavní etapa mezinárodního výzkumu MAP (The Mesoscale Alpine Programme), který je věnovaný studiu atmosférických a hydrologických procesů v alpských oblastech. Zaměřuje se na rozšíření našich znalostí o počasí a klimatu, které je ovlivněno složitou topografií, a tak i na zlepšení současných předpovědních schopností. Mezi osm hlavních vědeckých témat, která byla během MAP studována, byl zařazen i problém týkající se fénového proudění v údolí Wipp.

Údolí Wipp ve středu evropských Alp bývá často zasaženo jižním fénem. Během posledních 90 let zde byl zaznamenán pouze jeden rok bez fénové epizody. Tato oblast je ústředním místem pro výzkum fénu po více jak 150 let. Pro MAP roku 1999 byla tato oblast velmi dobře vybavena přístroji pro objektivní zkoumání fénových epizod. I údolí Rýna bylo pro tento výzkum vzhledem ke své složité topografii hustě pokryto mnoha měřicími přístroji, aby bylo získáno dostatečné množství dat.

V poslední době nastal rychlý vývoj numerického modelování atmosféry. Jsou k dispozici nové měřicí přístroje a metody dálkového průzkumu, lze zachytit třídimenzionální strukturu vzduchové hmoty a větrného pole s vysokým rozlišením. To dává velkou šanci, aby v rámci MAP bylo odpovězeno na celou řadu nedořešených problémů fénového proudění.

Vedle pozemních měřících stanic byla použita i celá řada jiných měřících přístrojů včetně několika radiosondážních stanic, měřících letadel, lidarů (Doppler lidar) atd.



To vše umožnilo získání informací takového počtu a kvality, jaké ještě nikdy nebyly u výzkumu fénu dostupné. Tato obrovská databáze poskytla reference pro zkoumání přesnosti numerických modelů vysokého rozlišení.

### 3.1 „Shallow“ a „deep“ fén

V poslední době se objevují nové pojmy spojené s fénovým prouděním, kterých bylo především během MAP hojně užíváno. Jsou to pojmy jako „gap flow“, „flow splitting“, „downslope windstorm“ nebo „shallow“ a „deep“ fén.

- **„Gap flow“** = „průsmyskové proudění“ Je zvláštní výraz pro proudění v podvrcholových úrovních. Je užíván, pokud je proudění ze stran a někdy i vertikálně zúženo v důsledku proniknutí do nějakého průsmyku či brázdy. Lze jej dobře popsat hydraulickou teorií, je-li odděleno od proudění vyšších vrstev, např. díky inverzi. Pokud od nich není jasně odděleno, hydraulická teorie již není pro jeho popis příliš vhodná. I otázka týkající se tohoto proudění byla zkoumána během MAP, především v oblasti Innsbrucku (údolí Wipp), protože zde jsou dostatečně jednoduché topografické podmínky.

- Jižní fén v Alpách je často dělený na dva typy **„shallow“** = „mělký“ a **„deep“** = „hluboký, obsáhlý“. Rozdíl spočívá ve struktuře proudění v úrovních nad vrcholkem a na umístění oddělujících se vrstev od fénového proudění vzhledem k výšce vrcholu.

**„Shallow“ fén** je proudění omezené do výšek nepřesahujících úroveň vrcholku. Pro „shallow“ fén je proudění vyšších vrstev slabé nebo má jiný směr, bývá rovnoběžné s hlavním alpským hřebenem, často má západní směr. Proudění může sestupovat do závětří jako „shallow“ fén, pokud prochází průsmyky, ale nepřechází přes okolní horské vrcholy.

Fén se označuje **„deep“**, má-li geostrofický vítr nad vrcholkem složku kolmou k pohoří, proudí tedy přes vrcholek, a proto je síla pro proudění přes pohoří větší. Tento typ je často spojen s vlnovou aktivitou.

Pro některé případy fénu byl během MAP proveden detailní průzkum tří-dimenzionální struktury, kdy byl nalezen rozdíl mezi „shallow“ a „deep“ fénem během životního cyklu fénu.

### 3.2 Hydraulická teorie

Další z otázek řešených během MAP v údolí Wipp byla, zda se přízemní fénové proudění nedá dostatečně popsat hydraulickou teorií. Tato teorie předpokládá, že proudění vzduchu lze popsat rovnicemi pro proudění mělké vody. V nejjednodušším případě je problém proudění jedné vrstvy tekutiny s volným povrchem dán do souvislosti s prouděním jedné vrstvy mělké vody přes překážku.

Vertikální rozvrstvení vzduchu při jižním fénu v Alpách je obvykle takové, že existuje vrstva se stabilním zvrstvením (často teplotní inverze), pod kterou se nachází

oblast fénového proudění, které je méně stabilně zvrstvené. Pod touto vrstvou má vítr jižní směr kolmý na pohoří a nad ní se jeho směr mění na západní, který vane podél pohoří. Díky tomuto oddělení je vliv terénu v podstatě omezený pouze na fénovou vrstvu a nepřenáší se do proudění vyšších vrstev. Proto dynamika fénu, zvláště „shallow“ fénu, může být do jisté míry řízena hydraulikou mělké vody. V modelech pak výška volné hladiny systému reprezentuje výšku stabilní vrstvy. Pro dobře vyvinutý „deep“ fén může změna proudění nastat dokonce až v tropopauze, tedy se zde nemusí vyskytovat žádná zřetelná teplotní inverze. Oddělení není pak tak výrazné jako pro „shallow“ fén a hydraulickou teorii pro popis proudění nelze užít.

Jak v údolí řeky Wipp tak i v údolí Rýna bylo naměřeno teplotní zvrstvení, které je charakterizováno prouděním v údolí a nad ním se nacházejícím tokem ve spodní troposféře. Začátek epizody fénu je charakterizován tokem, který je soustředěný v údolí („shallow“ fén). Prostřednictvím tří-dimenzionálního pozorování vzduchu a větrného pole bylo zdokumentováno, že v údolí Wipp i v údolí Rýna lze zvláště toto proudění v nižších vrstvách („shallow“ fén) dostatečně přesně popsat hydraulickou teorií. Například hydraulický skok se nachází jak v pozorováních lidarů tak v simulacích. Dokonce i různé chování, co se týče rozdělení hmotnosti v „flow-splitting“ (viz. 3.4), se zdá být přes tento přístup vysvětlitelné.

Díky této hydraulické povaze mělkého fénu vzniká nový pohled na fén. Tedy teorie, že fén je ve skutečnosti „maskovaná bóra“, která již byla rozebrána v kapitole 2.

### 3.3 Nestálost fénového proudění

Proč je přízemní fénové proudění tak neustálené a proč nastávají fénové pauzy? To je další otázka řešená během MAP.

S fénovým prouděním jsou velmi často spojeny vlny. Ty mohou být dvou původů. **Závětrné vlny** jsou stojaté vlny s vlnovými délkami v řádu šířky pohoří. Vznikají vychýlením vzduchu na horské překážce. Dokládají je typické fénové oblaky altocumulus lenticularis, které se díky adiabatické expanzi objevují na vrších těchto závětrných vln. **Gravitační vlny** vznikají na rozhraní dvou různě hustých prostředí, která se vůči sobě pohybují. Vytváří se tedy na rozhraní fénového vzduchu a chladného stojatého vzduchu v závětrí („cold pool“). Mechanismus jejich vzniku je podobný jako pro vlny, které vytváří vítr na vodní hladině. Jejich perioda závisí na vertikálním profilu teploty a větru, bývá o něco větší než Brunt-Vaisala frekvence (v řádu 10-20min). Tyto vlny způsobují malé fluktuace tlaku na povrchu v řádu desetin  $hPa$ .

Pak, díky hydraulickému charakteru fénového proudění v údolí Rýna, může být vysvětlena vysoká proměnlivost proudění. Jelikož je proudění v údolí se svým hydraulickým charakterem citlivé i na nepatrné změny v stabilitě, reaguje na vlnový režim či hydraulické skoky, které mohou při fénu nastat.

### 3.4 Problematika topografie

Je zřejmé, že složitá topografie způsobuje podstatně vyšší komplikovanost fénového proudění ve srovnání s přechodem vzduchu přes jednoduchý vrch. Porozumění struktuře proudění má samozřejmě veliký význam pro předpověď počasí. Je proto pochopitelné, že během MAP byla věnována pozornost také uspořádání fénového proudění v závislosti na složitosti topografie. Bylo usilováno o správné vysvětlení vlivu bočních údolí, poklesů terénu, průsmyků („gap flow“) či blokování přímé cesty proudění. Dále také bylo zkoumáno uspořádání fénového proudění při významných změnách směru údolí nebo jeho větvení, tzv. „**flow splitting**“ = „dělení, štěpení proudění“.

V údolí Rýna byla během MAP nainstalována mezo-sít', aby mohla analyzovat komplexní tlakové pole a aby mohla být srovnána s modelovou simulací. Bylo proto zjištěno, že rozvržení tlaku při fénu odpovídá přibližně rozdělení tloušťky relativně studeného fénového vzduchu. Mnohonásobné změny ve směru Rýnského údolí pak při „shallow“ fénu vedou k dalším rychlým změnám v tloušťce relativně chladného (mělkého) fénového vzduchu, který prochází skrz údolí Rýna. Což spolu s horním vlnovým režimem vede ke změně přízemního tlakového pole s odpovídajícím dopadem na pole větru.

I průsmyky a brázdy příčně k Alpským hřebenům mají veliký dopad na strukturu proudění. Brázda umožňuje relativně chladnému návětrnému proudu vzduchu při fénu proudění ve směru závětrí. To, že Rýnské údolí má mnoho takových přechodů, vede formou stále přízemní advekce studeného vzduchu k poměrně nízkým potenciálním teplotám v horním alpském Rýnském údolí. Kromě toho tvary jednotlivých přechodů jsou velmi specifické pro rozmístění proudnic fénu.

Fén, obzvláště jedná-li se o „shallow“ fén, se často soustřeďuje v mnoha průsmycích a údolích Alp, mezi nimiž může docházet k štěpení fénového proudění. Dříve bylo studováno „flow splitting“ pro jednoduché topografie, tj. okolo izolovaného kopce, více v [3]. Smith z lineární teorie ukázal, že nastává dělení proudění okolo hor pokud existuje stagnační bod a pokud Froudovo číslo  $Fr = U/hN$  (kde  $U$  je rychlost větru,  $h$  výška překážky a  $N$  Brunt-Vaisala frekvence) je dostatečně malé.

Uspořádání proudění je více složitější pokud topografie, okolo které se vlnění štěpí, nemůže být popsána tímto jednoduchým modelem. V tomto případě musí být uváženy různé části topografie, které usměrňují proudění.

Během MAP proběhla v průniku Rýnského údolí s údolím Seez studie dynamiky „flow splitting“, které bylo vyvoláno „shallow“ fénem. Pozorování bylo provedeno pomocí větrného lidarů (Doppler lidar) a kombinováním změřených dat s hydraulickou teorií. Studie provedené v [3] ukazují, že dělení proudění je spojeno s existencí stagnačního bodu v průniku obou údolí a ohybem proudění díky postraním stěnám údolí.

G Zängl a spol. provedli studii (viz. [9]), kde analyzovali strukturu fénového proudění lokálních měřítek v údolí Rýna a stručně je porovnali s některými charakteristikami proudění udávanými pro údolí Wipp.

Obě údolí jsou známá častými fénovými epizodami, ale jejich topografická struktura se od sebe značně liší. Zatímco údolí Wipp vede téměř rovně a končí v hlavním alpském údolí, údolí Rýna má několik ohybů a končí v alpském předhůří. Lze tedy předpokládat, že i lokální struktura fénového proudění se bude mezi těmito údolními lišit.

Během fénové epizody bylo v Rýnském údolí provedeno podrobné měření pole větru a potenciální teploty. Odpovídající pole potenciální teploty ukázalo vysoce nehomogenní charakter. Některé části jsou chladné (nejchladnější je Kostnické jezero a přilehlá část Rýnského údolí). V jiných částech zase potenciálně velice teplý vzduch sestupoval z horského pásma (např. Rätikon). Tyto nehomogenity jsou způsobeny pravděpodobně tím, že „flow-splitting“ ve spojení údolí Rýna s údolím Seez podporuje proniknutí vyjímečně teplého vzduchu. Když část vzduchu přicházejícího z jihovýchodu vpadne do údolí Seez, je pak vzduch z vyšších vrstev nucen klesat dolů. Navíc turbulentní vertikální promíchávání stabilně zvrstveného vzduchu blízko povrchu může přispívat ke zvyšování povrchové potenciální teploty. Pozorované difference teploty mezi Churem a Vaduzem se dobře shodují s nasimulovanými, pozorované difference teploty byly 8 K zatímco modely ukazovaly 7,5 K

Je zajímavé srovnat toto zvýšení teploty v údolí Rýna s pozorovaným zvýšením teploty v údolí Wipp. Zvýšení potenciální teploty podél údolí Wipp bylo v rozmezí pouze mezi 2 K a 4 K. A je známo, že hodnoty nad 5 K zde nastávají velice vzácně. Tento rozdíl ve zvýšení teplot při fénu může být vysvětlen faktem, že tvar údolí Wipp je téměř rovný, proto zvýšení potenciální teploty podél údolí může být vyvoláno pouze vertikálním turbulentním mísením.

Tedy lze shrnout, že výstupy modelových simulací fénu spuštěných během MAP potvrdily pozorovanou dynamiku fénu. Ale roli průsmyků a údolí stále ještě není plně porozuměno.

# Kapitola 4

## Předpověď a diagnostika fénu

Fénový vítr má v údolích svého výskytu značný dopad na životy obyvatel. Může s sebou přinášet mnoho problémů, jako jsou rozsáhlé požáry a jiná, především ze silného větru plynoucí, nebezpečí (například pro leteckou ale i jinou dopravu). Fén také bývá spojen se zvýšenými koncentracemi ozonu a znečištěním vzduchu. Proto je samozřejmě v popředí výzkumů, jak tento meteorologický jev v čas a úspěšně předpovídat.

Žádosti o předpověď fénové epizody a její intenzity také často přicházejí z lyžařských středisek, která jsou značně ovlivněna fénem a s ním přicházejícími vysokými teplotami, neboť pro vyrábění umělého sněhu a pro přípravu lyžařských svahů je třeba znát teploty předem.

Jak je patrné z následujícího textu, téma fénové předpovědi bylo zkoumáno i během MAP a není stále dořešeným problémem. Předpovědní metody stále nejsou zdaleka stoprocentní.

### 4.1 Problémy a vývoj předpovědi fénu

Fén je meteorologický jev malého měřítká, který silně závisí na topografických podmínkách daného místa. Pokud tato topografie není dostatečně vyřešena v operačních NWP („numerical weather prediction“) modelech, je přímá objektivní předpověď fénu nemožná. Toto v současné době platí pro většinu fénových regionů, kde je nedostatek místních modelů a pro předpověď je užíváno globálních modelů.

Předpověď fénu je založena na synoptické situaci, především na tlakovém poli. Díky silné topografické závislosti se fén může vyvinout v jednom údolí a v dalším ne. Z těchto důvodů jsou dovednosti zkušených meteorologů, kteří se věnují předpovědi fénu a kteří dobře znají místní situaci, stále nezbytným předpokladem k úspěšné předpovědi. S dostatečnými osobními zkušenostmi jsou jejich schopnosti v předpovídání fénu velmi vysoké.

Proto se také v průběhu času v různých místech výskytu fénu vyvinuly specifické předpovědní metody. Dále jsou uvedena některá předpovědní schémata jak pro oblasti Alp tak pohoří USA.

- Ve Švýcarsku roku 1966 Widmer vyvinul schéma k předpovídání jižního fénu pro Altdorf. Toto schéma bylo později roku 1971 zjednodušeno Courvoisierem a Gutermannem a zůstává v provozu dodnes. Původně byla tato metoda založena na pozorování a předpovídání fénu deterministickou cestou na následující dva dny. Později byly pro výpočet předpovědního indexu užívány dva tlakové gradienty přes Alpy a směr jednoho z nich. Pokud je index pod jistou prahovou hodnotou, která závisí na období, pravděpodobnost výskytu fénu v Altdorf v příštích 36 hodinách může být až přes 70%.
- Dürr, také ve Švýcarsku, vyvinul automatickou metodu pro identifikaci fénu. Jeho metoda je založena na 10 minutách aktuálních dat z automatické švýcarské meteorologické sítě. Nejdůležitější předpovědní faktory jsou diference v potenciálních teplotách mezi referenční stanicí Gutsch a oblastí, pro kterou má být fén identifikován. Od července 2008 je tato metoda používána jako automatický rutinní předpovědní prostředek v MeteoSwiss.
- V Severní Americe se zabývali předpovědí ničivých nárazů fénového větru. Předpovědní studie fénu proběhly v Skalnatých horách. Americký vědec Oard V Montaně roku 1993 vyvinul regresní rovnici pro předpovídání závětrné větrné bouře („downslope windstorm“) 3-12h předem. Toto schéma je založeno především na diferencích geopotenciální výšky v 700 hPa napříč pohořím a jejich teplotních změn. Ověřování tohoto schématu přineslo dobré výsledky pro předpovídání nárazů větru s rychlostí větší než  $13 \text{ m s}^{-1}$ .
- Také vědci Nance a Colman roku 2000 testovali nelineární, dvou-dimensionální model pro předpovídání závětrné větrné bouře pro několik oblastí USA. Jejich přístup přinesl slibné výsledky, značné množství pozorovaných nárazů větru se shodovalo s jejich numerickou simulací.
- Colle a Mass roku 1998 pro Kaskádové pohoří ve Washingtonu vyšetřovali závislost větrných bouří na intenzitě větru na vrcholu pohoří, gradientu tlaku přes pohoří a dalších faktorech. Ukázali, že proudění vzduchu na úrovni vrcholku a tlakový gradient mají hlavní vliv na závětrné větrné bouře.

Je tedy patrné že zvyšující se počet numerických modelových studií fénu přináší slibné výsledky. Dokonce mohou být úspěšně nasimulovány i fénové struktury malých měřítek, jako je tlakové a větrné pole, gravitační vlny či hydraulický skok. Avšak rozlišení užívané pro tyto simulace je asi desetinásobně lepší než to, které je užíváno v modelech pro rutinní předpovědi.

I během MAP byla posuzována kvalita dnešních operativních předpovědních modelů mezo-synoptických měřítek. Tyto modely sice udávají reálná proudová a teplotní pole. Avšak turbulence jsou modely jen stěží zachyceny. Spočtené hodnoty turbulentní kinetické energie jsou nižší než ty, které byly pozorovány letadly. Aby byly zachyceny všechny podrobnosti a místní zvláštnosti fénu, horizontální rozlišení

modelů by muselo být mnohem lepší než v současnosti používaných téměř 10 km. Například úspěšná simulace fěnu ve údolí Wipp vyžaduje měřítko v řádu 1 km a nižší.

Nárůst prostorového rozlišení ale není jediným kritériem pro úspěšnou lokální předpověď fěnu. Je také třeba správně určit počáteční podmínky, zejména pokud jde o správné zachycení „jezer“ studeného vzduchu („cold pool“). Navíc zásadní roli na přízemní fénové proudění má vlnový režim proudění ve vyšších vrstvách.

## 4.2 Užití pomocných parametrů pro předpověď fěnu

Ačkoliv, jak již bylo řečeno, fén silně záleží na topografických vlastnostech malého měřítka, existují i podmínky větších měřítek, které musí být splněny, aby fén mohl nastat. Vybrání vhodných proměnných, popisujících tyto podmínky, může pak být použito pro předpovídání fěnu.

Tímto přístupem se v poslední době zabývali Susanne Drechsel a Georg Mayr. Roku 2008 vyvinuli objektivní předpovědní metodu fěnu pro údolí Wipp v rakouském Innsbrucku, která je založena na výstupu globálního modelu ECMWF.

Tento výzkum se zabýval jak diagnostikováním fěnu tak i jeho předpovědí v závislosti na jednom nebo dvou pomocných parametrech. Test probíhající 3 roky prokázal, že touto metodou může být provedena spolehlivá předpověď fěnu a s ním spojeného silného větu až na 3 dny.

Vzhledem k zajímavosti a důležitosti této studie jsou dále uvedeny některé její detaily a výsledky (zpracováno z [2]).

### • Diagnostika fěnu

Přestože fénový vítr je často doprovázen překvapivými změnami teploty a vlhkosti, rozeznat ho od ostatních větrů může být někdy velice obtížné. Běžná metoda odhalování fénového větru (tzv. **přímá diagnostika**) z pozorovaných dat je subjektivní analýza dočasných změn větru, teploty a vlhkosti tzv. tří bodovou metodou.

Nástup fěnu je diagnostikován, když je stočení větru do příslušného směru doprovázeno zvýšením rychlosti větru a nárazovitostí spolu s růstem teploty a poklesem relativní vlhkosti. Konec výskytu fěnu je charakterizován opačnými znaky. Tyto signály mohou být ale velice slabé a nejasné.

Během MAP byly vyvinuty objektivní klasifikační metody. Tyto metody využívají toho, že při sestupu fénového vzduchu dolů z pohoří dochází k turbulentnímu promíchávání tak, že potenciální teplota v závětrí je přinejmenším stejně vysoká jako na vrcholku. Dále je ještě vyžadován příslušný směr větru, minimální rychlost na obou stranách vrcholku (asi  $1 - 2 \text{ m s}^{-1}$ ) a jisté rozdíly potenciálních teplot  $\Theta$ .

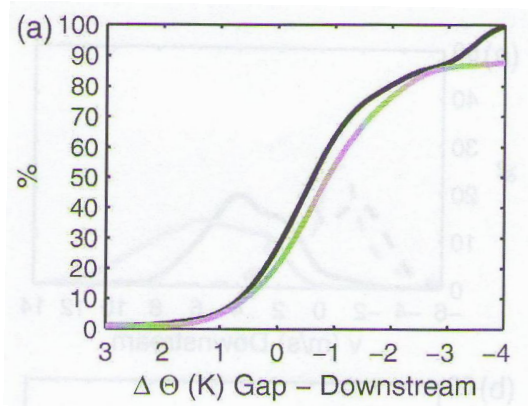
Protože topografie v globálních modelech se příliš liší od skutečné, není možné je používat k přímé klasifikaci větru. Proto modely musí využívat jiné charakteristiky tzv. **pomocné fénové diagnostiky**. Vyhodnocením modelů se potvrdila vhodnost užití tlakových diferencí  $\Delta p$  přes horské pásmo a poklesu izentrop (změny potenciální

teploty  $\Delta\Theta$ ) jako těchto pomocných parametrů pro diagnostikování fénového větru z modelových analýz. Výsledky se dobře blíží pozorováním a tato metoda je daleko úspěšnější než metoda přímé diagnostiky.

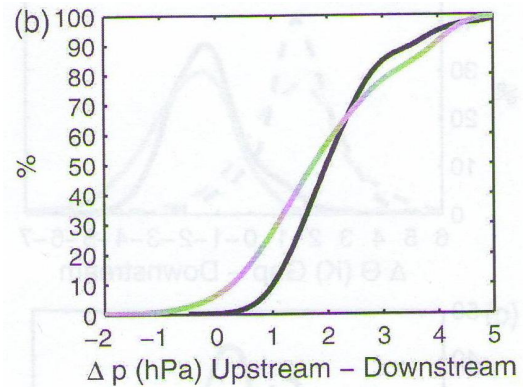
• **Užití jednoho z pomocných parametrů pro určení pravděpodobnosti fěnu**

Pro spočtení pravděpodobnosti výskytu fěnu byl pomocný parametr rozdělen do intervalů. Pravděpodobnost výskytu fěnu pak byla spočtena pro každý interval zvlášť jednoduše pomocí poměru fénových případů vůči všem (fénovým i nefénovým) v uvažovaném intervalu.

Z obrázků 4.1 a 4.2, kde jsou znázorněny spočtené pravděpodobnosti fěnu z pozorování (barevná křivka) a z analýzy dat (černá křivka), je patrné, že bylo dosaženo velmi dobrých výsledků. Pravděpodobnost fěnu je téměř 0% pro pozorované difference potenciální teploty  $\Delta\Theta$  převyšující  $1,5 K$  nebo pro tlakové difference nižší než  $-1 hPa$ . Pro hodnoty pomocného parametru  $\Delta p > 4.5 hPa$  bylo dosaženo pravděpodobnosti téměř 100%, pro  $\Delta\Theta < -3K$  se křivka pravděpodobnosti zastavuje na 90%.



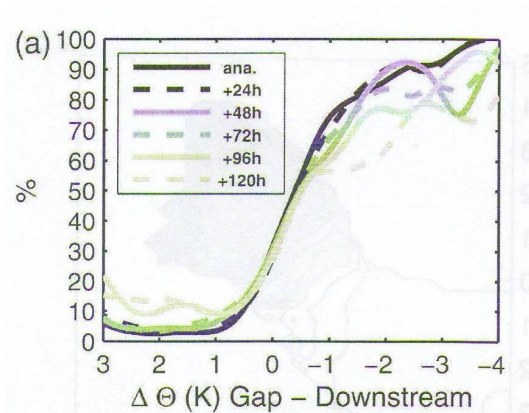
Obrázek 4.1: Pravděpodobnost fěnu spočtená pro parametr  $\Delta\Theta$  (převzato z [2])



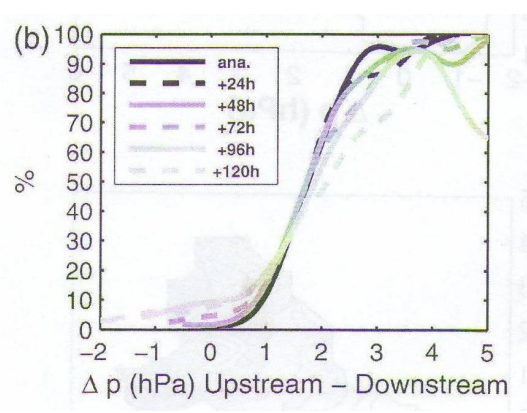
Obrázek 4.2: Pravděpodobnost fěnu spočtená pro parametr  $\Delta p$  (převzato z [2])

Tento pravděpodobnostní postup byl také aplikován na předpovídání fěnu. Pravděpodobnosti byly spočteny stejným způsobem, ale pomocné parametry  $\Delta p$  a  $\Delta\Theta$  byly získány z předpovědních dat. Pravděpodobnostní křivky 4.3 a 4.4 získané z předpovědních datových souborů ukazují zřetelný vzestup fénové pravděpodobnosti během malého rozsahu prediktorů  $\Delta p$  a  $\Delta\Theta$ , a jsou velice podobné předešlým křivkám rozboru dat. Však s rostoucím časem, na který je předpověď prováděna, předpovědní nejistota také vzrůstá. Pro předpověď na dobu vyšší než 96h se pravděpodobnostní křivky začnou značně lišit od křivek spočtených z analýzy dat. Především již není dosaženo 0% a 100% pravděpodobností na okrajích. Tato změna je se zvyšující se dobou, na kterou je předpověď počítána, pomalejší pro prediktor  $\Delta p$  než pro  $\Delta\Theta$ .





Obrázek 4.3: Pravděpodobnost fénu spočtená pro předpovězený parametr  $\Delta\Theta$  (převzato z [2])



Obrázek 4.4: Pravděpodobnost fénu spočtená pro předpovězený parametr  $\Delta p$  (převzato z [2])

#### • Pravděpodobnost fénu pro kombinování pomocných parametrů

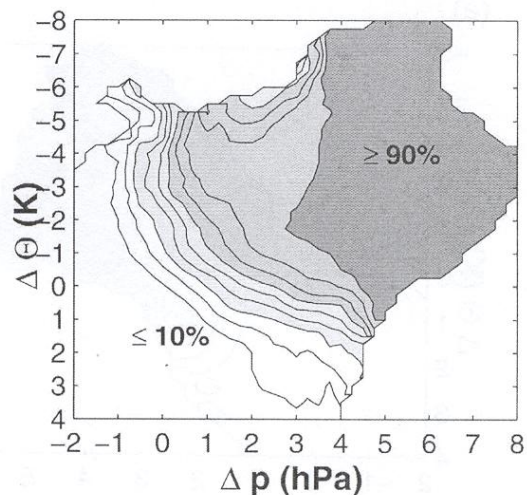
Protože pomocný parametr  $\Delta p$  představuje řídicí sílu pro fén a  $\Delta\Theta$  předpoklad sestupu fénového vzduchu k povrchu, zkombinování obou parametrů je dalším logickým krokem pro zlepšení předpovědi fénové epizody. Pravděpodobnost byla opět spočtena jako zlomek fénových případů a všech členů tentokrát v dvourozměrném intervalu  $\Delta p$  a  $\Delta\Theta$ .

Užívání  $\Delta p$  a  $\Delta\Theta$  jako samotných prediktorů poskytuje dvě hodnoty pravděpodobnosti, které nemusí být pro danou situaci identické. Tyto pravděpodobnostní hodnoty jsou průměrem hodnot, na které působí celé spektrum druhého prediktoru. Proto kombinace  $\Delta p$  a  $\Delta\Theta$  přináší jasné zlepšení oproti užívání pouze jediného prediktoru. Neměníme-li hodnotu jednoho z parametrů, pravděpodobnost se může pohybovat ve velkém rozsahu spojené pravděpodobnosti. Například pro pevnou diferenci tlaku  $\Delta p = 2 hPa$  se pravděpodobnost s měnící se teplotou může pohybovat mezi 10% pro  $\Delta\Theta > 2,5 K$  až 80% pro  $\Delta\Theta < -1,5 K$ . Pro porovnání, jeli  $\Delta p$  použito jako samostatný prediktor je pro  $\Delta p = 2 hPa$  pravděpodobnost asi 55%. To jasně ukazuje výhody užívání spojené pravděpodobnosti.

Vyšetřování údajů získaných z pozorování ukázalo obecně silnou závislost pravděpodobnosti fénu na obou predictorech  $\Delta p$  a  $\Delta\Theta$ . Podobně jako u jednotlivých parametrů pravděpodobnost narůstá od pouhých 10% do 80% pro  $\Delta\Theta < 0$  a  $\Delta p > 3,5 hPa$  (obrázek 4.5)

Rozdělení spojených pravděpodobností získané vyhodnocením modelů se již velmi dobře blíží té spočtené z pozorování.

Dokonce i předpověď fénu spočtená metodou spojených pravděpodobností na 120h dopředu převýšila pravděpodobnost 90% pro tlakové difference větší než  $3,5 hPa$  a klesající isentropy ( $\Delta\Theta < 0 K$ ). Ovšem oblast výrazného růstu pravděpodobnosti začíná se zvyšujícím se časem kolísat.



Obrázek 4.5: Pravděpodobnost spočtená pro spojení parametrů  $\Delta\Theta$  a  $\Delta p$  (převzato z [2])

### 4.3 Pravděpodobnostní předpověď intenzity fěnu

Zatímco předpověď výskytu fěnu je důležitá pro otázky spojené s kvalitou vzduchu nebo vyrábění umělého sněhu v lyžařských střediscích, fén také přináší nebezpečí plynoucí z vysokých rychlostí větru.

Jak je vyjádřeno Bernoulliho rovnicí, rychlost větru je závislá na tlakových diferencích. Proto, na rozdíl od předpovídání fénové události, předpověď nárazů větru během fěnu se může opírat pouze o jeden samotný prediktor  $\Delta p$ . Odvození předpovědních vztahů pro intenzitu větru je podobné jako pro výskyt fěnu, jak bylo popsáno výše.

I tato studie proběhla v údolí Wipp. Vyhodnocením modelů byla pravděpodobnost, že aktuální rychlosti větru převýší prahovou hranici, spočtena jako funkce tlakových diferencí v modelových analýzách. Práhová hranice rychlosti větru byla nastavena podle Beaufortovy stupnice. Silná vichřice nastala s pravděpodobností 80%, pokud tlakové diference byly  $5hPa$ . Aby pravděpodobnost větrné bouře (o síle 10. stupně Beaufortovy stupnice) byla 80% tlakové diference musely být téměř  $6hPa$ .

Tyto pravděpodobnosti zůstávají stejné, jsou-li spočteny z předpovídaných hodnot tlakových diferencí asi na 3 dny. Podobně jako tomu bylo pro pravděpodobnostní předpověď fénové události.

# Kapitola 5

## Dopad fénu na společnost

Je zřejmé, že fén má v oblastech svého výskytu značné dopady na lokální klima. Ovlivňuje tak samozřejmě i zemědělství v fénových údolích a životy zdejších obyvatel. V důsledku zvýšení průměrné teploty lze například pěstovat některé druhy rostlin tam, kde by to jinak nebylo možné. Proto se v údolích severních Alp vyskytují teplomilné vysokohorské rostliny, nebo zde lze pěstovat víno.

Příchod vysokých teplot spojených s fénem na jaře v horách také značně podporuje tání sněhu a ledu a urychluje růst rostlin. Příchod jara v fénových oblastech tak může být velice rychlý a vzhled krajiny se zcela promění ve velmi krátkém čase. Ovšem tento efekt není již tolik vítaný v lyžařských střediscích.

Fén také bývá spojen s velmi čistým vzduchem, a tak i vysokou dohledností. Vzdálené předměty se pak zdají být mnohem blíže.

Vedle pozitivních účinků existuje však celá řada negativních, které jsou dále rozebrány.

### 5.1 Nebezpečí spojená s fénovým větrem

Zjevně největším nebezpečím, které s sebou fén přináší, je vysoké riziko vzniku rozsáhlých požárů. Teplý a velmi suchý vzduch spojený s fénem v kombinaci s vysokými rychlostmi větru poskytuje velmi dobré podmínky pro rychlé šíření požárů. V minulosti opakovaně docházelo k velkým požárovým katastrofám, při kterých lehly popelem celé vesnice nebo velké lesy. Následuje několik konkrétních případů (zpracováno z [7]).

Například roku 1861 ve švýcarském městě Glarus bylo během fénové bouře zničeno asi šest stovek domů. I v nedávné době roku 2001 oheň rozšiřovaný větrem o rychlosti až  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  zničil 15 domů v městě Balzers (Lichtenštejnsko).

V několika městech jsou stále během fénové epizody aktivovány noční hlídky, aby včas upozornily na požár. Také bývá přísně zakázáno kouřit venku během fénu. V některých regionech je nelegální rozdělávat oheň mimo speciálně určená území.

Fénová epizoda bývá často spojena s velmi prudkým a nárazovitým větrem, který nejen že může způsobit rozsáhlé hmotné škody, ale může být také velmi nebezpečný pro leteckou i jinou dopravu. Profesionální piloti a místní letiště jsou si dobře vědomi

tohoto nebezpečí. Ke konci 19. století se však s tím, jak se sporty jako paragliding nebo horkovzdušné balony staly populárními, také zvýšil počet nehod způsobených prudkým větrem. Zlepšování tréninku, bezpečnostních kurzů a předpovědí redukovalo, ale ne zcela vyřešilo tento problém.

Silný fénový vítr také může způsobit nehody lanovek nebo dokonce i vykolejení vlaků, i přestože je u všech lanovkových přepravních systémů vyžadováno, aby monitorovaly rychlost větru a měly alarm.

V červenci roku 2008 v Jungfrau se stala právě taková nehoda. Silný vítr během fénové bouře vykolejil kabinku lanovky. Nejdříve lanovka zastavila a kabinka byla chycena bezpečnostními zábrany, ale následný prudký závan shodil zachycenou kabinku na zem. Jeden člověk zemřel a několik lidí bylo vážně zraněno. Alarm nespustil, neboť rychlost větru tehdy dosahovala asi  $25\text{ms}^{-1}$ , což je pod hodnotou spuštění alarmu  $28\text{ms}^{-1}$ . Téměř stejný incident se přihodil roku 2003 v Wangs-Pizol, ale tenkrát byla kabinka prázdná a nikdo nebyl zraněn.

I na jezerech se projevují fénové bouře, které mohou ohrožovat lodní dopravu. Švýcarské město Brunnen v Rýnském údolí dokonce postavilo speciální „fénový přístav“, který je lépe chráněn proti vlnám a poryvům větru.

Dalšími nebezpečnými jevy, které jsou spojeny s fénem, mohou být náhlé oblevy, laviny či prudké povodně, které může způsobit rychlé tání sněhu a ledu.

## 5.2 Ozón a znečištění

Další stinnou stránkou fénu je fakt, že s sebou přináší zvýšení koncentrace ozonu v ovzduší. Jak u jižního tak severního fénu v oblasti Alp bylo zjištěno, že jsou doprovázeny relativně vysokými ozonovými koncentracemi.

Díky tomu, že při fénu dochází k silným sestupným pohybům vzduchu, dostává se tak k povrchu i vzduch z vyšších vrstev troposféry, tedy z oblastí se zvýšenou koncentrací ozonu, tj, ozonoféry, která je ve výškách 20-25km nad zemským povrchem.

V letech 1996–1998 proběhl v Alpách mezinárodní projekt zkoumající vertikální transport ozonu VOTALP a pokračoval projektem VOTALP II (1998-2000). Součástí tohoto programu byla speciální studie věnovaná vyšetřování koncentrace ozonu během jižního fénu. Ozonová situace ve východních Alpách byla vyšetřována během periody jižního fénu 4-6 května 1997. Událost byla studována detailně užitím měření na povrchu, sondami a letadlovými měřeními meteorologických a chemických parametrů.

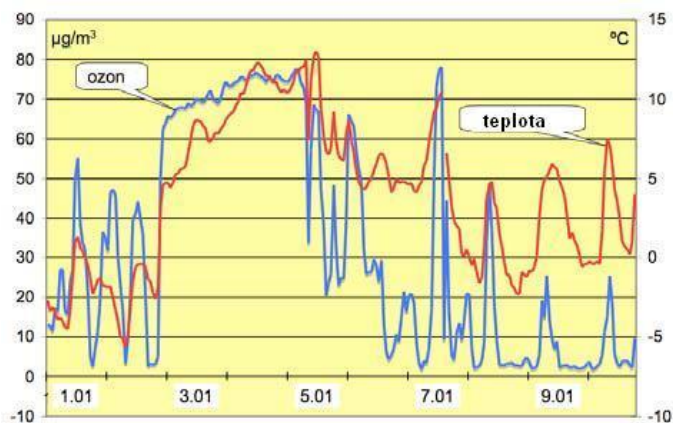
Klimatologickými studiemi je potvrzeno, že fén přináší zvýšení ozonové koncentrace do fénových oblastí. I zde se samozřejmě potvrdilo, že během fénu ve všech stanicích v oblasti fénu byla koncentrace ozonu zvýšena. Dle [5] bylo také zjištěno, že denní proměnlivost ozonové koncentrace, která je pozorována v údolích za normálních podmínek, je během fénu téměř nepřítomna. Během fénové epizody je pak nárůst v průměrné koncentraci nejvýraznější v údolích během druhé poloviny noci a časného rána, kdy jsou potlačena běžná denní minima v koncentraci ozonu. Nárůst je také více patrný v údolních stanicích, méně na stanicích v horách. To můžeme

částečně vysvětlit faktem, že vysoká rychlost větru a turbulence při fénu naruší procesy, které obvykle vedou k nočnímu minimu na povrchu. Avšak dokonce i horské stanice zaznamenaly malé zvýšení koncentrace ozonu během fénu.

Počátek zkoumané fénové epizody (4. květen 1997) přinesl výrazné zvýšení v hodnotách ozonu. Tento nárůst byl zřejmě způsoben tím, že při jižním fénu mohou vzduchové masy obsahovat zvýšenou ozonovou koncentraci, která vzniká fotochemicky v jižních alpských údolích během předcházejících slunných dnů. Během delší fénové epizody je zvýšení ozonové koncentrace oproti dlouhodobému průměru nejspíše způsobeno vzduchem z vyšších vrstev.

Hodnoty koncentrace ozonu však jen zřídkakdy dosáhnou nebezpečných hodnot. Fénový vzduch obsahuje až třikrát více ozonu díky klesajícímu vzduchu z velkých výšek, kde je přirozeně vysoká koncentrace ozonu.

Jak vypadá situace ozonu při výskytu fénu je zobrazeno na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Ozon při fénu v Altdorfu v červenci 2008

Vyšší potenciální teplota vzduchu, která je s fénem spojena, může také způsobit větší úroveň znečištění vzduchu. V oblastech, kde fénové proudění nepronikne úplně k zemskému povrchu, může fénový vzduch vytvářet jakýsi příklop, který díky vyšší potenciální teplotě fénového vzduchu zachytí těžší chladnější vzduch a s ním i znečišťující látky pod sebou. Tím se zmenší objem, ve kterém se vzduch může promíchávat, a může se tak značně zvýšit úroveň znečištění v dané oblasti. Tento mechanismus se častěji vyskytuje během chladných období. Poté co fén pronikne do oblasti studené masy vzduchu, látky, které zde byly zachyceny, se turbulentním promícháváním dostávají pryč, a tak končí období vysokého znečištění.

Například, když fénový vítr sestupuje na závětrné straně a narazí na mnohem chladnější stojatý vzduch (tzv. „cold pool“). Pokud to topografie dovolí, tento chladný vzduch je obvykle za pár hodin odfouknut. Ale mohou se vyskytnout případy, kdy topografie brání odfouknutí tohoto studeného vzduchu, například údolí Rýna ve Švýcarsku s překážkou Jurského pohoří. Navíc i pouhá zatáčka osy hlavního údolí může bránit tomu, aby byl studený vzduch spláchnut pryč. Tato situace může trvat někdy

až několik dní. Studený vzduch má tvar klínu, který s povrchem typicky svírá úhel 2 stupně. Vzduch v „cold pool“ zůstává klidný, zatímco nad jeho horní hranicí přes něj fouká fénový vítr, který je často velice prudký.

### 5.3 Biologické účinky

Často také bývá diskutován vliv tohoto teplého větru na lidský organismus. Tvrdí se, že nejen lidé, ale i zvířata trpí pod vlivem tohoto větru. Je pozorováno, že fén u některých lidí způsobuje zdravotní obtíže nebo může mít psychologické účinky. Především v alpských oblastech lidé viní fén téměř ze všeho. Fénu je připisována nespavost, zpomalení reakcí, únava, podrážděnost. U některých lidí může způsobit nervozitu, deprese či bolesti hlavy. Při fénové epizodě nastává dokonce i více sebevražd. Ze statistik je patrné, že během fénu se vyskytuje více srdečních infarktů a závažných dýchacích problémů.

Ve Švýcarsku byl dokonce proveden průzkum zabývající se závislostí počtu případů infarktu myokardu na počasí. Zdravotní a meteorologická data byla zkorelována víceproměnnou analýzou založenou na lineárním modelu za předpokladu Poissonova rozdělení. Výsledky ukázaly, že vysoký atmosferický tlak, vysoké tlakové gradienty a silný vítr byly spojeny se zvýšením až o 6000 hospitalizací s infarktem myokardu. Bylo zjištěno, že sníh a déšť nemá na množství případů žádný efekt, ale teplota a fén jasně ukazují statisticky významný dopad.

V Americe zase proběhlo několik projektů zkoumajících souvislost chinooku s bolestmi hlavy. Jeden takový průzkum zabývající se vlivem chinooku na pravděpodobnost migrénových bolestí hlavy proběhl v jižní části kanadské provincie Alberta, kde lidé trpící migrénami často přisuzují jejich bolesti právě tomuto teplému větru. Na 75 pacientech byla zkoumána pravděpodobnost nástupu migrény v závislosti na dnech s chinookem, bez chinooku nebo dnech předcházejících chinooku. Regresními modely pak bylo zjištěno, že pravděpodobnost migrény se zvýšila jak pro dny před i během chinooku s porovnáním se dny bez chinooku. Také byla zkoumána závislost na rychlosti větru. Bylo vyhodnoceno, že pro dny s chinookem se riziko migrény zvýšilo pouze ve dnech s vysokými rychlostmi větru. Podskupina jedinců byla citlivá na dny s vysokou rychlostí větru a druhá podskupina pouze na dny předcházející chinooku, ale většina pacientů nebyla citlivá na žádnou z těchto podmínek.

Ze studie tedy vyplynulo, že jak dny před chinookem, tak dny s ním zvýšily pravděpodobnost migrény u podmnožiny pozorovaných pacientů. Protože pouze dva pacienti byli citliví na obě povětrnostní podmínky, zdá se, že citlivost na tyto povětrnostní podmínky je nezávislá. Ale je zřejmé, že ani tyto přímé analýzy frekvence bolestí hlavy a případu fénu nepřinesly žádné výrazné výsledky.

Je možné, že iontová koncentrace a fluktuace tlaku by mohly být důvodem fénem způsobených obtíží. Současná měření však ukazují, že inotová koncentrace není spojena s fénovou epizodou. Tlakové fluktuace způsobené gravitačními vlnami, které bývají s fénem spojeny, zůstávají možným vlivem fénu na člověka.

Statistické analýzy fluktuací tlaku a subjektivních pocitů lidí ukazují, že se zde

opravdu vyskytuje jakési statistické spojení. Avšak není zde žádný přímý důkaz. Tato pozitivní korelace může také odrážet pouze to, že lidé se cítí lépe za pěkného počasí. Jak bylo naznačeno výše, dosud nenastal žádný významný pokrok ve vysvětlení vztahu nemocí a větrů fénového typu.

# Závěr

V práci je ukázáno, že klasická učebnicová teorie fénu, která teplý závětrný vítr vysvětluje jako důsledek uvolňování latentního tepla při výstupu vzduchu na návětrné straně hor a která byla blíže popsána v kapitole 1, není vždy vyhovující pro pozorované případy fénu.

Ostatně již v první části kapitoly 1 o historii výzkumů fénu bylo poukázáno na to, že se tato teorie potýkala s nedůvěrou již od počátků svého vzniku a není ani zcela pravdivé, že se jedná o 140 let starou Hannovu teorii, jak je obecně rozšířeno.

Z kapitoly 2 jasně vyplynulo, že je skutečně pozorována celá řada případů fénového větru, které namají původ popsany klasickou teorií. Dnes je známo několik jiných mechanismů, kterými je možno vysvětlit původ fénového proudění. Významným z nich je již přes sto let známá teorie sestupu vzduchu z vyšších vrstev za pohorím. Je tedy poněkud znepokojující, že nejenom populární publikace, ale i moderní učebnice často obsahují pouze klasickou termodynamickou teorii fénu bez uvedení jakéhokoliv jiného možného schématu.

Na druhé straně ale opravdu existují případy, které přesně kopírují učebnicovou teorii. Nelze ji proto zavrhnout úplně. Pozorování jasně ukazují, že během fénu se často objevují silné srážky především na návětrné straně vysokých horských komplexů.

S fénovým větrem je stále spojeno velké množství nedořešených problémů a otázek, jako je jeho silná topografická závislost, jeho předpověď nebo vliv na společnost. V dnešní době nastává rychlý rozvoj v numerickém modelování atmosféry a v metodách měření, což samozřejmě umožňuje další výzkumy přinášející nové důležité poznatky. V kapitole 3 bylo provedeno shrnutí nejnovějších poznatků získaných především během MAP (Mesoscale Alpine Programme), kdy byl fén zařazen jako jedna z vyšetřovaných otázek.

Výstupy modelových simulací fénu spuštěných během MAP potvrdily pozorovanou dynamiku fénu. Ale roli průsmyků a údolí stále ještě není plně porozuměno.

Během MAP díky tří-dimenzionálnímu pokrytí vzduchových mas a větrného pole byly jasně zdokumentovány hydraulické povahy některých fénových případů. To přináší zcela nový a odlišný pohled na fén. Potvrzuje se, že v některých případech fénu se jedná vlastně o „maskovanou bóru“. Což představuje další případy, kdy fén nevzniká dle klasické teorie.

Díky silnému dopadu fénu na společnost a životní prostředí, který je blíže popsán v kapitole 5, je zřejmá důležitost otázky, jak tento jev předpovídat. I tento problém byl řešen během MAP, v práci je předpovědi fénu věnována samostatná kapitola



(kapitola 4). Metody předpovědi fénu stojí na třech pilířích. Díky silné topografické závislosti fénu jsou i v dnešní době stále důležité dovednosti zkušených meteorologů. Předpověď fénu může dále být založena na pravděpodobnostních metodách, které užívají několika pozorovaných nebo předpovídaných parametrů. Tento přístup, kterým se v údolí Wipp zabývali Susanne Drechsel a Georg Mayr, je také blíže popsán v kapitole 4. Jako předpovědních faktorů (prediktorů) je použito rozdílů tlaku přes pohoří a izentropický pokles. Toto schéma založené na statistickém zpracování modelových výstupů vykazovalo dobré výsledky a je možné jej aplikovat v fénových regionech po celém světě.

Třetím pilířem předpovědi jsou výstupy modelů. Současný rychlý vývoj modelových studií fénu přináší slibné výsledky. Avšak rozlišení nutné pro tyto simulace je stále příliš často nedostupné v operativním provozu modelů. Mezoměřítkové modely dnes ještě nejsou pro spolehlivou předpověď fénu dostatečně přesné. Ale lze očekávat, že další zlepšování rozlišení a parametrizace modelů povede v budoucnu ke zlepšení předpovídání fénu.

# Literatura

- [1] Bednář J. (2003): *Meteorologie*, Portál, Praha
- [2] Drechsler S., Mayr J.(2008): *Objective Forecasting of Foehn Winds for a Subgrid-Scale Alpine Valley*, Wea. Forecasting, **23**, 205–218.
- [3] Drobinski P., Dabas A.M., Haeberli C., Flamant P. H.(2001): *On The Small-Scale Dynamics of Flow Splitting in The Rhine Valley during a Shallow Foehn Event.*, Boundary-Layer Meteorology ,**99**, 277–296
- [4] Mayr G.J. a kol.(2004): *Gap Flow Measurements during The Mesoscale Alpine Programme*, Meteorology Atmospheric Physic, **86**, 99—119
- [5] Seibert P., Feldmann H., Neininger B., Bäumle M., Trickl T.(2000): *South foehn and ozone in the Eastern Alps - case study and climatological aspects*, Atmospheric Environment **34**, 1379–1394.
- [6] Steinacker R.(2006): *Alpiner Föhn – eine neune Strophe zu einem alten Lied*, Promet, **32**, 3–10

## Internetové odkazy

- [7] Richner H., Hächler P. (2008): *Understanding and Forecasting Alpine Foehn- What Do We Know about It Today?*  
<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/141372.pdf>
- [8] Seibert P.(2005): *Hann's Thermodynamic Foehn Theory and its Presentation in Meteorological Textbooks in the Course of Time*  
[http://www.meteohistory.org/2004polling\\_preprints/docs/abstracts/seibert\\_abstract.pdf](http://www.meteohistory.org/2004polling_preprints/docs/abstracts/seibert_abstract.pdf)
- [9] Zängl G., Chimani B., and Häberli C.: *Numerical Simulations of the MAP-IOP 10 Foehn Case in the Rhine Valley*  
<http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/icam2003/341.pdf>