

HOLTANOVÁ, E., HALENKA, T., 2023. Scénáře změny klimatu. In: TOLASZ, R., POLCAROVÁ, E. (Eds.), 2023. Sborník příspěvků z První konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). Praha: ČHMÚ, 27–33, ISBN 978-80-7653-063-8.  
<https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.03>

---

## Scénáře změny klimatu (Climate change scenarios)

Eva Holtanová, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova,

[eva.holtanova@matfyz.cuni.cz](mailto:eva.holtanova@matfyz.cuni.cz)

Tomáš Halenka, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova,

[tomas.halenka@matfyz.cuni.cz](mailto:tomas.halenka@matfyz.cuni.cz)

**Abstrakt:** Scénáře změny klimatu představují přijatelné alternativní stavy klimatu v budoucnosti, které mohou nastat za určitých předpokladů o vývoji antropogenních vlivů na klima, zejména emisí a koncentrací skleníkových plynů a aerosolů, ale také změn ve využívání povrchu. Možné cesty vývoje byly dříve předkládány ve formě emisních scénářů, dnes jsou k dispozici širěji pojaté "socio-economic pathways - SSPs". Scénáře změny klimatu jsou nástrojem pro nalezení mezí možného budoucího vývoje. Odhady budoucího vývoje klimatu lze vytvářet různými způsoby. Základní metody vycházejí dnes nejčastěji z hodnocení výstupů globálních klimatických modelů, s případnou aplikací některé z metod zmenšování měřítká (downscalingu). Výstupy modelů je poté třeba před další aplikací podrobit některému z postupů postprocessingu, s cílem zmenšit vliv známých modelových chyb. Dále je třeba hodnotit rozsah nejistoty spojené s výslednými daty. Představeny budou zejména postupy používané v rámci projektu PERUN, ale i další možnosti, včetně nejnovějších přístupů, např. tzv. "storylines".

**Klíčová slova:** antropogenní vlivy na klima – socio-ekonomický scénář – scénář změny klimatu

**Abstract:** Climate change scenarios represent plausible alternative future climate states that can occur under certain assumptions about the evolution of anthropogenic climate forcings, in particular emissions and concentrations of greenhouse gases and aerosols, but also changes in land use. Possible pathways used to be presented in the form of emission scenarios, but today more broadly defined 'socio-economic pathways' (SSPs) are available. Climate change scenarios are a tool for finding the limits of possible future developments. Estimates of future climate can be made in different ways. Nowadays they are mostly based on the outputs of global climate models, with possible application of downscaling approach. The model outputs then need to be subjected to some form of post-processing before further application in order to reduce the impact of known model errors. The extent of uncertainty associated with the resulting data should also be assessed. In particular, the procedures used in the PERUN project will be presented, but also other options, including recent approaches such as storylines and global warming levels will be mentioned.

**Keywords:** anthropogenic climatic forcings – socio-economic pathway – climate change scenario

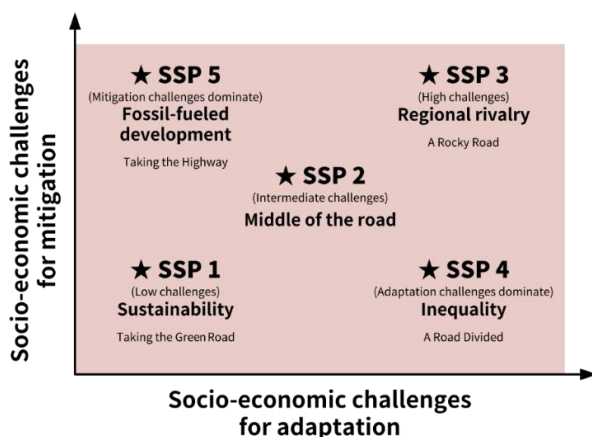
### 1. Úvod

Scénáře změny klimatu představují přijatelné alternativní stavy klimatu v budoucnosti, které mohou nastat za určitých předpokladů o vývoji antropogenních vlivů na klima, zejména emisí

a koncentrací skleníkových plynů a aerosolů. Vliv přirozených faktorů, jako je sopečná činnost či změny sluneční aktivity se většinou v těchto scénářích neuvažují, především z důvodu jejich omezené předpověditelnosti. Scénáře jsou tedy nástrojem pro nalezení rámce či meze budoucího vývoje. V žádném případě se nejedná o předpovědi budoucího vývoje v deterministickém smyslu. V současnosti jsou obvykle scénáře postaveny na výstupech klimatických modelů, dříve byly používány i jiné přístupy, např. hledání analogů v geologické minulosti Země apod. (viz např. IPCC-TGICA 2007). S rostoucí dostupnou výpočetní kapacitou a pokrokem ve formulaci klimatických modelů se v poslední době pozornost upírá téměř výhradně na klimatické modely.

## 2. Scénáře emisí

Prvním krokem před samotným odhadem budoucích změn klimatu je stanovení možného vývoje faktorů, které klima ovlivňují. Míru jejich působení lze posoudit podle tzv. radiačního působení na klimatický systém. Jde o vliv uvažovaných faktorů na radiační bilanci na horní hranici atmosféry (Forster et al. 2007). Radiační působení se udává ve  $W \cdot m^{-2}$ . Kladné radiační působení implikuje zvýšení radiační bilance a tedy oteplení klimatického systému.



Obr. 1 Schematické znázornění charakteristik jednotlivých „shared socio-economic pathways“. Převzato z O'Neill et al. (2014).

Fig. 1 Schematic overview of shared socio-economic pathways. Adopted from O'Neill et al. (2014).

Vývoj v oblasti nových technologií, ekonomie, životního stylu i politických opatření je značně nejistý. Proto se pro odhady dopadů možných změn klimatu používají scénáře možného socio-ekonomického vývoje. Jednou z prvních generací byly tzv. SRES emisní scénáře (zkratka odvozená ze „Special report on emission scenarios“, Nakićenović et al. 2000). Tyto scénáře počítaly s různými směry demografického, společenského, ekonomického, technologického i ekologického vývoje společnosti. Žádnému se nepřisuzovala větší ani menší pravděpodobnost ani přijatelnost. SRES emisní scénáře byly vyvinuty tak, že nejdříve bylo vytvořeno celkem 40 různých socio-ekonomických scénářů a následně byl pro každý z nich navržen možný vývoj antropogenních emisí skleníkových plynů a aerosolů. Tento „sériový“ postup byl značně časově náročný a málo pružný (Moss et al. 2010), proto byl postupně nahrazen jiným přístupem. Nový „paralelní“ přístup vedl k vytvoření čtyř tzv. „Representative concentration pathways“ (RCPs). Ty charakterizují různé možnosti vývoje koncentrací skleníkových plynů, aerosolů a změn využívání povrchu v průběhu 21. století (Moss et al., 2010). Číselné označení RCP popisuje odhad radiačního působení v roce 2100 oproti období před průmyslovou revolucí. Nejnovější přístup představují SSPs (shared socio-economic pathways), které svým způsobem kombinují oba předchozí přístupy. Klasifikují různé možnosti vývoje společnosti a přístupy k adaptaci a mitigaci změn klimatu (jako to bylo u SRES scénářů), ale využívají odhady radiačního působení pro studium dopadů změny klimatu (jako RCPs). Základní

rozdělení SSPs je ukázáno na obr. 1. V dalším textu budeme pro jednoduchost často používat termín emisní scénář i pro RCPs nebo SSPs.

### 3. Globální klimatické modely a metody zmenšování měřítka

V posledních dvou desetiletích je dominantní metodou tvorbou scénářů změny klimatu pro daný emisní scénář použití klimatických modelů, tedy numerických modelů procesů v klimatickém systému. V nejnovějších globálních klimatických modelech (GCM), nebo přesněji „*Earth system models (ESMs)*“, jsou zahrnuty i komponenty popisující celou řadu dějů v oceánu, na mořském ledu, zemském povrchu, chemismus atmosféry i procesy v biosféře. V některých modelech je tak dokonce možná simulace uzavřeného uhlíkového cyklu a tím přímé určení koncentrací CO<sub>2</sub> na základě předepsaných emisí (Taylor et al. 2012). Jde o vskutku revoluční pokrok, protože dosud bylo nutné klimatickým modelům předepisovat přímo koncentrace skleníkových plynů, což vnášelo nepřesnosti do modelové simulace.

Z různých typů experimentů prováděných s GCM jsou pro tvorbu scénářů změny klimatu klíčové dva. Jednak historické běhy, tedy simulace pro zvolené referenční období, kdy jsou modelu zadávány vnější vlivy (okrajové podmínky) podle známých pozorování. Na těchto simulacích se jednak hodnotí schopnost GCM simulovat základní klimatické charakteristiky, dále pak slouží jako základní kámen pro vytvářený scénář (viz dále). Dále jsou důležité samozřejmě samotné scénářové běhy, tzn. simulace pro zvolené budoucí období, kdy jsou modelu vnější vlivy zadávány podle zvoleného emisního scénáře. V poslední generaci CMIP6 GCMs (Eyring et al. 2016) jsou scénářové běhy startovány v roce 2015 a pokračují do roku 2100 nebo dále.

Horizontální rozlišení atmosférické části GCM se pohybuje mezi 0.5° až 4° zeměpisné délky/šířky. Jejich výstupy jsou tedy použitelné v globálním či kontinentálním měřítku, ale pro aplikace v měřítku regionálním či lokálním je nutné uplatnit některou z metod zmenšování měřítka (downscalingu). Tyto metody lze rozdělit do dvou hlavních skupin. Prvním je statistický downscaling, založený na popisu statistických vztahů mezi velkoprostorovými prediktory a klimatickými prvky v regionálním či lokálním měřítku. Tyto vztahy jsou zjišťovány na pozorovaných datech, a následně aplikovány na výstupy GCM. Bližší popis metod statistického downscalingu viz např. (Huth 2002; Maraun et al. 2015). Zcela odlišným přístupem je dynamický downscaling, tedy aplikace numerického modelu analogicky ke GCM, kdy ale simulace neprobíhá na celém glóbu, ale pouze na určité omezené oblasti. Tyto numerické modely se nazývají regionální klimatické modely (RCM). Okrajové podmínky zadávané na hranicích integrační domény jsou přebírané buď z výstupů GCM, anebo z reanalýz. Horizontální rozlišení RCM je v současnosti obvykle méně než 25 km, výjimkou nejsou simulace v tzv. „*convection-permitting*“ módu s rozlišením pod 3 km (Lucas-Picher et al. 2021).

### 4. Zpracování modelových výstupů a tvorba scénáře

Tvorba scénáře, postaveného na výstupech GCM nebo RCM, může probíhat různými způsoby. Při výběru konkrétního postupu je potřeba zohlednit účel, pro který je scénář tvořen (region, časové období, proměnné). Je důležité mít na paměti, že základem všech metod tvorby scénáře změny klimatu jsou kvalitní pozorovaná data. Bez nich by nebylo možné validovat klimatické modely ani aplikovat žádnou z dále zmíněných metod.

Nejjednodušším postupem je tzv. delta metoda. Z historického a scénářového modelového běhu se spočtou dlouhodobé průměry pro zvolená časová období (z historického běhu pro referenční období, ze scénářového pro budoucí období), a spočte se jejich rozdíl. Podle povahy zkoumané veličiny se jedná buď o relativní, nebo absolutní rozdíl. Vypočtená hodnota představuje modelový odhad změny průměrné hodnoty dané veličiny. Podobně lze určovat i změny dalších statistických charakteristik, např. variability. Zjištěné odhady změn následně

poslouží k modifikaci pozorovaných časových řad v referenčním období. Delta metoda byla v projektu PERUN použita pro první odhady změn teploty a srážek.

Pokročilejší metodou, která byla a je používána pro zpracování výstupů modelu ALADIN-CLIMATE/CZ je tzv. postprocessing nebo „bias-korekce“, kdy jsou simulované časové řady pro budoucí období upravovány tak, aby byly odstraněny odchylky (chyby) zjištěné jako rozdíly mezi časovými řadami v historickém běhu a pozorovanými hodnotami. Jednou z nejrozšířenějších metod je kvantilová metoda (Déqué 2007), která aplikuje korekce pro jednotlivé kvantily statistického rozložení zkoumané veličiny. Základním předpokladem, na kterém stojí všechny metody bias-korekce je, že modelové chyby jsou konstantní v čase, a tedy korekce nastavená pro referenční období bude platná a dostačující i pro období budoucí. Nevýhodou většiny těchto metod je navíc fakt, že korekce jsou určovány a aplikovány pro jednotlivé proměnné zvlášť. Hrozí tak zpřetrhání fyzikálních vztahů mezi meteorologickými prvky. Tento problém alespoň částečně řeší nové postupy, které zohledňují právě vícerozměrnou povahu meteorologických dat (Canon 2018).

Existují i další metody pro tvorbu scénářů změny klimatu, např. „pattern scaling“ (viz např. Lee et al. 2021) nebo použití generátorů počasí (viz např. Wilks 2010).

## 5. Zdroje nejistot

Pokud odhlédneme od nejistoty ve vývoji faktorů, které klima ovlivňují, tak nejistoty ve výstupech klimatických modelů vycházejí ze dvou hlavních zdrojů: nejistá reakce klimatického systému na dané vnější působení a velikost a povaha vnitřní variability (proměnlivost vycházející z nelineární deterministicky chaotické povahy klimatického systému) (viz např. Abramowitz et al. 2019). Nejistotu vycházející z vnitřní variability klimatu odhadujeme pomocí souborů simulací jednoho GCM s „perturovanými“, tj. mírně pozměněnými, počátečními podmínkami. Odhad celkové nejistoty je obvykle postaven na rozsahu multi-modelového souboru (ansámbly). GCMs dnes existuje na šest desítek, do jisté míry se vzájemně liší svou strukturou, tj. zejména prostorovým a časovým rozlišením, typem sítě uzlových bodů, použitými numerickými metodami a schémata pro parametrizaci procesů malých měřítek. Nikdy ale nebudeme schopni vytvořit takový multi-modelový soubor, který by vystihoval celý rozsah neurčitosti. V poslední době intenzivně diskutované téma je vzájemná podobnost některých modelů, kterou je třeba nějakým způsobem zohlednit při zpracování jejich výstupů (viz např. Merrifield et al. 2023).

Rozsah neurčitosti postavený na základě multi-modelového souboru lze zmenšit pomocí vážení modelů, příkladem jednoho z nejnovějších přístupů může být např. „*ClimWIP*“ (Brunner et al. 2020). V této metodě je kombinováno hodnocení schopnosti modelů vystihnout klima ve zvoleném referenčním období a vzájemná závislost modelů (menší váha je dána modelům, které mají v ansámbly své blízké „příbuzné“).

## 6. Závěr

Vedle výše popsaných, dnes už prakticky „klasických“ metod tvorby klimatických scénářů a hodnocení souvisejících nejistot, chceme závěrem zmínit i alternativní přístup, který se v odborné literatuře čím dál více objevuje. Jedná se o „storylines“, které představují určité „příběhy“, které mohou za daných okolností v budoucnu nastat (Shepherd et al. 2019). Zpravidla se takové analýzy zaměřují na nějaký konkrétní region a určitý aspekt klimatu. Může se jednat např. o analýzu toho, jaký by mělo dopad nějaké určité adaptační nebo mitigační opatření na lokální úrovni. Jiným příkladem může být zkoumání dopadů velmi silných bouří na určitý region a možný vliv opatření v rámci městské zástavby apod. (Shepherd et al. 2019).

Dále je nutné zmínit problém, který se týká nejnovější generace CMIP6 globálních modelů. U některých z nich byla totiž zjištěna výrazně vyšší citlivost klimatu (climate sensitivity, tj. reakce

klimatického systému na zdvojnásobení koncentrací oxidu uhličitého) než u předešlé generace. Výsledkem je řada projekcí změny klimatu, které dávají výrazně vyšší změny průměrné globální teploty. Tato vyšší citlivost pravděpodobně neodpovídá realitě (Hausfather et al. 2022). Zároveň ale nelze jednoduše vynechat z našich analýz všechny modely, které mají citlivost vyšší než je určitá zvolená mez. Jedním z řešení tohoto problému, které se nabízí, je metoda „global warming levels“. Zde se pro konkrétní hodnotu změny globální průměrné teploty hledá regionální odpověď, např. pro aktuální cíle globálního oteplení o 1,5 °C nebo 2 °C. Nastává zde tedy posun od zkoumání klimatu v určitém časovém období ke zkoumání klimatických podmínek na regionální úrovni za daných globálních průměrných hodnot. Zůstává ještě řada otevřených otázek, např. závislost na trajektorii předcházející dosažení dané hodnoty oteplení (např. James et al. 2017).

V neposlední řadě zmíníme přístup „seamless prediction“, který lze do češtiny přeložit asi jako „bezešvá předpověď“. Smazávají se zde hranice mezi deterministickou předpovědí počasí a projekcemi vývoje klimatu, protože v klimatickém systému probíhá množství procesů a zpětných vazeb na celém spojitém spektru časových a prostorových měřítek (Hurrell et al. 2007). Určitým vyústěním tohoto přístupu jsou nejnovější iniciativy, které si kladou za cíl vytvoření tzv. „digital twins“, tedy počítačových modelů vybraných komponent klimatického systému do všech detailů. V Evropě nyní např. vzniká ambiciózní projekt „*Destination Earth*“ (<https://destination-earth.eu/>). V kombinaci s nástroji strojového učení (machine learning) slibují takovéto iniciativy velký pokrok ve zkoumání procesů v klimatickém systému a možný posun v tvorbě scénářů změny klimatu.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

## Literatura

ABRAMOWITZ, G., HERGER, N., GUTMANN, E., HAMMERLING, D., KNUTTI, R., LEDUC, M., et al., 2019. ESD reviews: Model dependence in multi-model climate ensembles: Weighting, sub-selection and out-of-sample testing. *Earth System Dynamics*, **10**(1), 91–105. <https://doi.org/10.5194/esd-10-91-2019>

BRUNNER, L., PENDERGRASS, A. G., LEHNER, F., MERRIFIELD, A. L., LORENZ, R., KNUTTI, R., 2020. Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth System Dynamics*, **11**(4), 995–1012.

CANNON, A. J., 2018. Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate dynamics*, **50**, 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>

DÉQUÉ, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, **57**, 16–26.

EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C. A., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., et al., 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model. Dev.*, **9**(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

FORSTER, P., RAMASWAMY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., et al., 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M.



Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

HAUSFATHER, et al., 2022. Climate simulations: recognize the 'hot model' problem. *Nature*, 605.7908 (2022): 26–29.

HURRELL, J., BADER, D., DELWORTH, T., KIRTMAN, B., MEEHL, J., et al., 2007. Seamless Prediction. White paper for the U.S. Inter-Agency Working Group on Climate Modeling.

HUTH, R., 2002. Statistical Downscaling of Daily Temperature in Central Europe. *Journal of Climate*, **15**, 1731–1742.

IPCC-TGICA, 2007. General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 pp.

JAMES, R., et al., 2017. Characterizing half-a-degree difference: a review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **8**(2), e457.

LEE, J.-Y., MAROTZKE, J., BALA, G., CAO, L., CORTI, S., et al., 2021. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>

Lucas-Picher, P., Argüeso, D., Brisson, E., Trambly, Y., Berg, P., Lemonsu, A., et al., 2021. Convection-permitting modeling with regional climate models: Latest developments and next steps. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **12**(6), e731.

MARAUN, D., et al., 2015. VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, **3**(1), 1–14. <https://doi.org/10.1002/2014EF000259>

MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z. R., LEWIS, J., GIDDEN, M. J., VOGEL, E., FREUND, M., et al., 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, **13**(8), 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>

MERRIFIELD, A. L., BRUNNER, L., LORENZ, R., HUMPHREY, V., KNUTTI, R., 2023. Climate model Selection by Independence, Performance, and Spread (ClimSIPS v1. 0.1) for regional applications. *Geoscientific Model Development*, **16**(16), 4715–4747.

MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K., MANNING, M., ROSE, S. K., et al., 2010. The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*, **463**(7282): 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

NAKIĆENOVIĆ, N., SWART, R. (Eds.), 2000. Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

O'NEILL, B.C., KRIEGLER, E., RIAHI, K., et al., 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, **122**, 387–400.

SHEPHERD, T. G., 2019. Storyline approach to the construction of regional climate change information. *Proceedings of the Royal Society, A* 475.2225:20190013.

<https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rspa.2019.0013>

TAYLOR, K., STOUFFER, R. J., MEEHL, G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of American Meteorological Society*, **93**, 485–498.

<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

WILKS, D. S., 2010. Use of stochastic weathergenerators for precipitation downscaling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **1**(6), 898–907.