

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Ochrana životního prostředí



Martin Hrubý

Problematika perfluorovaných a polyfluorovaných látek v lyžařských voscích
Perfluorinated and polyfluorinated substances in ski waxes

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:
prof. RNDr. Tomáš Cajthaml, Ph.D., DSc.

Praha 2023

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze,

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. RNDr. Tomášovi Cajthamlovi, Ph.D., DSc. za odborné a bezproblémové vedení práce, trpělivost a ochotu.

Abstrakt

Perfluorované a polyfluorované sloučeniny (PFAS) představují skupinu tisíců antropogenně vytvořených látek. Silná vazba uhlíku a fluoru dává těmto sloučeninám jedinečné vlastnosti, kterých bylo využito mimo jiné v lyžařských voscích. Existují omezená data o konkrétních PFAS užívaných při výrobě vosků. Důvodem je nejen náročná analýza, ale také neochota výrobců tyto informace sdělit. Aplikace lyžařských vosků je spojována se zvýšenými koncentracemi PFAS v krvi a některými plicními problémy. Kvůli perzistentnosti se PFAS v lyžařských oblastech dají nalézt ve sněhu, půdě, zvířatech i na rostlinách. Přestože dochází k postupnému zakazování výroby a užívání těchto látek, problematika PFAS v lyžařských voscích přetrvává. Tato práce se zaměřuje na jednotlivé aspekty celé problematiky.

Klíčová slova: perfluorované a polyfluorované sloučeniny, PFAS, PFOA, lyžařské vosky

Abstract

Perfluorinated and polyfluorinated compounds (PFAS) represent a group of thousands of anthropogenically produced substances. The strong bonding of carbon and fluorine gives these compounds unique properties, which have been used in ski waxes, among other applications. There is limited data on the specific PFAS used in wax production. This is due not only to the difficulty of analysis but also to the reluctance of manufacturers to disclose this information. The application of ski waxes has been associated with increased PFAS concentrations in the blood and some lung problems. Because of their persistence in ski areas, PFAS can be found in snow, soil, animals and plants. Although there is a gradual ban on the production and use of these substances, the issue of PFAS in ski waxes continues. This paper focuses on particular aspects of the issue.

Key words: perfluorinated and polyfluorinated substances, PFAS, PFOA, ski waxes

Obsah

Seznam zkratk	7
1 Úvod	8
2 Dělení PFAS	9
2.1 Perfluorované látky	9
2.2 Polyfluorované látky	10
3 Vliv PFAS na zdraví	11
4 Analytické metody PFAS	12
5 Legislativní omezení PFAS	13
5.1 Omezení skupiny PFSA	13
5.2 Omezení skupiny PFCA	13
5.3 Navrhovaná omezení	14
6 Funkce PFAS ve voscích a jejich dělení	15
7 PFAS v lyžařských voscích	17
8 Expozice při užívání lyžařských vosků	20
8.1 Vznik aerosolů a PFAS ve vzduchu	20
8.2 Plicní onemocnění související s aplikacemi vosků	21
8.3 PFAS v krvi voskovačů	22
9 Perzistence v životním prostředí	25
10 Historický pohled, aktuální situace a budoucnost	27
11 Závěr	30
12 Zdroje	32

Seznam zkratek

8:2 FTOH	8:2 fluorotelomerní alkohol
ACGIH	Americká konference vládních průmyslových hygieniků
EHP	Evropský hospodářský prostor
ECHA	Agentura EU pro chemické látky
FIS	Mezinárodní lyžařská federace
FTOH	Fluorotelomerní alkohol
IBU	Mezinárodní biatlonová unie
PFA	Perfluorované alkany
PFAS	Perfluorované a polyfluorované látky
PFBS	Perfluorobutansulfonová kyselina
PFCA	Perfluorokarboxylové kyseliny
PFDA	Perfluorodekanová kyselina
PFDoDA	Perfluorododekanová kyselina
PFHpS	Perfluoroheptansulfonová kyselina
PFHxA	Perfluorohexanová kyselina
PFHxS	Perfluorohexansulfonová kyselina
PFNA	Perfluorononanová kyselina
PFOA	Perfluorooktanová kyselina
PFOS	Perfluorooktansulfonová kyselina
PFSA	Perfluorosulfonové kyseliny
PFTeDA	Perfluorotetradekanová kyselina
PTFE	Polytetrafluorethylen
SFA	Semifluorované alkany

1 Úvod

První sloučeninu ze skupiny PFAS objevil v roce 1938 chemik Roy J. Plunkett ve firmě DuPont. Jednalo se polytetrafluorethylen (PTFE), který byl v roce 1945 patentován pod obchodní značkou Teflon (Kelly, 2016). V následujících letech se PFAS začaly hojně užívat. Vazba uhlíku a fluoru se považuje za jednu z nejsilnějších v organické chemii, díky čemuž mají perfluorované látky značně unikátní vlastnosti – především termickou a chemickou stabilitu, nízké povrchové napětí spojené s hydrofobním charakterem a odolnost vůči rozkladu (Lau et al., 2007). Postupem času začaly přibývat informace o negativních vlivech. Kvůli perzistentní povaze jsou dnes PFAS přítomné ve všech složkách životního prostředí (Brusseau et al., 2020; González-Gaya et al., 2019; Goodrow et al., 2020; Kim a Kannan, 2007), a to včetně lidského těla (Kannan et al., 2004; Monroy et al., 2008). Alarmující jsou také negativní vlivy PFAS na lidské zdraví zahrnující mimo jiné karcinogenitu (Steenland et al., 2020) a narušování funkcí reprodukčních orgánů (Vested et al., 2013). Některé z perfluorovaných sloučenin se nachází na seznamu látek zakázaných Stockholmskou úmluvou (Stockholm Convention, n.d.), přesto jsou dodnes ve velkém užívány mimo jiné při výrobě oblečení, obalových materiálů, hasicích přístrojů nebo lyžařských vosků (ECHA, 2023).

Lyžařské vosky s obsahem PFAS se začaly vyrábět v 70. letech (Masia, 2010). Přestože se těší výbornou účinností (Lutz et al., 2023), vzbuzuje výskyt perfluorovaných látek ve voscích vzhledem k výše uvedeným negativním vlastnostem pozornost. Cílem této práce je zhodnocení dat ohledně problematiky PFAS v lyžařských voscích se zaměřením na složení, expozici při užívání a kontaminaci životního prostředí, dále posouzení aktuální situace a dostupnosti dat a návrhy dalších výzkumů v oblastech této problematiky, kde je informací nedostatek.

2 Dělení PFAS

Fluorované sloučeniny se dělí na polymerní a nepolymerní. Nepolymerní se dají rozdělit na perfluorované a polyfluorované (obr. 1). Alkylová část perfluorovaných sloučenin je fluorovaná plně, u polyfluorovaných sloučenin je tato část fluorovaná částečně (ITRC, 2022). Dle vlastností se PFAS mohou dále dělit na iontové a neutrální (Yao et al., 2016).

Typickým zástupcem polymerních fluorovaných látek je PTFE (Druart et al., 2001). Mezi podskupiny perfluorovaných sloučenin mimo jiné patří perfluorosulfonové (PFSA) a perfluorokarboxylové kyseliny (PFCA) a perfluoroalkany (PFA) (ITRC, 2022). Do polyfluorovaných sloučenin se řadí podskupiny fluorotelomerní alkoholy (FTOH) a semifluorované alkany (SFA) (Nilsson, 2012).

2.1 Perfluorované látky

PFSA jsou sloučeniny s obecným vzorcem $C_nF_{2n+1}SO_3H$ (Buck et al., 2011). Mezi PFSA s dlouhým řetězcem se řadí takové sloučeniny, které mají 6 a více atomů uhlíku, tedy například kyselina perfluorohexansulfonová (PFHxS), perfluoroheptansulfonová (PFHpS) a perfluorooktansulfonová (PFOS). Kyselina perfluorobutansulfonová (PFBS) obsahující 4 atomy uhlíku je pak PFSA s krátkým řetězcem (ITRC, 2022).

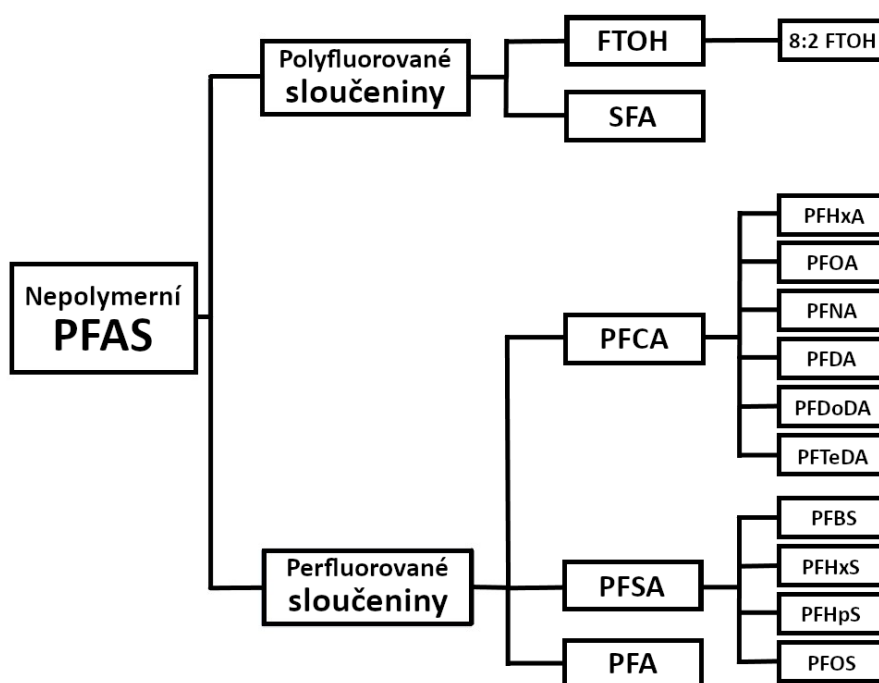
PFCA se v odborné literatuře namísto obecného vzorce $C_nF_{2n+1}COOH$ často značí zkráceně C_n . Podobně jako PFSA se dělí na krátké a dlouhé s tím rozdílem, že jako dlouhé se značí sloučeniny s 8 a více atomy uhlíku (Buck et al., 2011). Příkladem krátké PFCA je kyselina perfluorohexanová (PFHxA), mezi dlouhé PFCA zmíněné v této práci patří kyselina perfluorooktanová (PFOA), perfluorononanová (PFNA), perfluorodekanová (PFDA), perfluorododekanová (PFDoDA) a perfluorotetradekanová (PFTeDA).

Sumární vzorec PFA je popisován rovnicí C_nF_{2n+2} . Jedná se o plně fluorované alkany, ve kterých byly všechny atomy vodíku nahrazeny fluorem. Vzhledem k jednoduchosti se v literatuře namísto zkratk názvů sloučenin, jako tomu je v případě PFCA a PFSA, užívají právě sumární vzorce (Tsai, 2009).

2.2 Polyfluorované látky

Strukturní vzorec FTOH je $C_nF_{2n+1}CH_2CH_2OH$. Zjednodušeně se však sloučeniny z této skupiny označují jako X:Y FTOH, kde X představuje počet fluorovaných uhlíků a Y počet hydrogenovaných uhlíků, například 8:2 FTOH (Ellis et al., 2003).

SFA mají obecný vzorec $F(CF_2)_n(CH_2)_mH$ (nebo stručně F_nH_m). Jako dlouhé se označují takové SFA, které obsahují 22 a více atomů uhlíku (Buck et al., 2011).



Obrázek 1: Podskupiny nepolymerních PFAS s příklady sloučenin (upraveno dle Nilsson, 2012)

3 Vliv PFAS na zdraví

V letech 2004 až 2012 měl vědecký panel C8 za úkol zjistit, zda existuje "pravděpodobná souvislost" mezi PFOA a lidskými nemocemi. Panel pracoval na žádost západovirginského soudu a jeho práce byla součástí právního vyrovnání mezi obyvateli oblasti a firmou DuPont, která vyráběla Teflon a uvolňovala PFOA do okolního prostředí. Bylo provedeno 11 různých epidemiologických studií, kterých se účastnilo až 69 000 lidí (Steenland et al., 2020). Po šesti letech práce byly prokázány pravděpodobné souvislosti PFOA s několika nemocemi, jako jsou rakovina ledvin a varlat, hypertenze v těhotenství, onemocnění štítné žlázy, vysoký cholesterol a ulcerózní kolitida (C8 Science Panel, 2012).

Studie naznačují negativní vliv PFAS na dětské zdraví a jejich vývoj. Děti jsou ovlivňovány perfluorovanými sloučeninami dokonce ještě před narozením, jelikož PFAS prostupují placentární bariérou (Vested et al., 2013). Dle Fei et al. (2007) existuje spojitost mezi úrovní PFOA v krvi matky a porodní hmotností. Expozice PFOA dítěte v děloze dle Vested et al. (2013) také může ovlivnit kvalitu semene v dospělosti. Dle Grandjean et al. (2012) vedou zvýšené expozice perfluorovaným sloučeninám ke snížení hormonální odpovědi dětského imunitního systému. PFAS jsou také u dětí spojovány se sníženými hodnotami růstového hormonu IGF-1 a sexuálních hormonů (Lopez-Espinosa et al., 2016).

Hormonální rovnováhu mohou narušovat i FTOH. U samic ryby *Danio rerio* se po vystavení 8:2 FTOH zvýšily koncentrace testosteronu a estradiolu, u samců byla situace opačná a úrovně těchto hormonů se snížily (Liu et al., 2010). Expozice 6:2 FTOH ukázala jiné výsledky, testosteron i estradiol se zvýšil u obou pohlaví ryby *D. rerio*. Mechanismus účinku stále není známý, lze však uvažovat FTOH jako endokrinní disruptory (Liu et al., 2009).

Dle Massarsky et al. (2021) se PFAS ve velké míře akumulují v játrech, zkoumána tak byla i hepatotoxicita. Dle výzkumu Vědeckého panelu C8 nemá expozice PFOA souvislost s onemocněním jater (C8 Science Panel, 2012). Recentní studie se širším rozpětím perfluorovaných sloučenin (včetně PFOA) spojují PFAS s vyššími koncentracemi jaterních enzymů u hlodavců i lidí (Costello et al., 2022; Kim et al., 2023; Liao et al., 2023). Tyto data podporují souvislost PFAS s hepatotoxicitou, je však třeba dalších výzkumů (Costello et al., 2022).

4 Analytické metody PFAS

Chromatografie představuje běžnou analytickou metodu PFAS. Pro iontové PFAS (např. PFCA, PFSA) se používá kapalinová chromatografie, analýza volatilních PFAS (např. FTOH) se provádí plynovou chromatografií (Al Amin et al., 2020). V chromatografu se oddělí od látek obsažených v matici jednotlivé analyty (Coskum, 2016), které jsou pak identifikovány hmotnostní spektrometrií (Al Amin et al., 2020). Jedná se o cílenou analýzu a k zjištění jednotlivých sloučenin je tak zapotřebí referenční standard. Kvůli tomuto omezení lze takovým způsobem z tisíců PFAS analyzovat pouze desítky zástupců (ECHA, 2023).

Určitým řešením této překážky je metoda analýzy celkových oxidovatelných prekurzorů (ECHA, 2023). Při této metodě se neznámé PFAS oxidují na identifikovatelné sloučeniny s dostupným standardem. Příkladem užívaného oxidačního činidla jsou například hydroxylové radikály (Al Amin et al., 2020). Jak však z názvu vyplývá, výsledkem této analýzy je zjištění prekurzorů, nikoliv konkrétních perfluorovaných látek. Překážku představuje i fakt, že oxidaci nepodléhá celá řada PFAS.

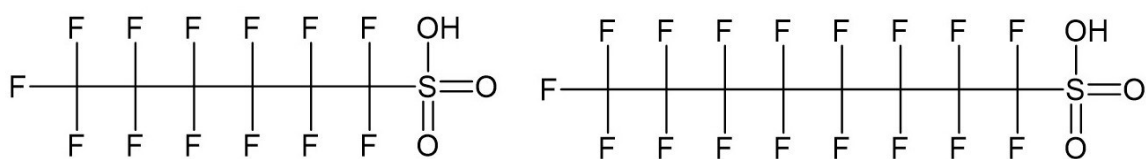
ECHA (2023) doporučuje k analýze PFAS také metodu celkového fluoru. Značnou nevýhodou je fakt, že analýza nerozliší, zdali zjištěný fluor pochází z přítomnosti PFAS, či nikoliv. Jedná se však o rychlou a levnou metodu, díky které je možno detekovat i takové PFAS, pro které neexistují standardy (ECHA, 2023).

5 Legislativní omezení PFAS

5.1 Omezení skupiny PFSA

PFOS (obr. 2) a její deriváty byly omezeny ze strany Evropského parlamentu již v roce 2006 (*Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/122/ES*, 2006). Na přílohu B Stockholmské úmluvy byla přidána v roce 2009 (Stockholm Convention, n.d.). Aktuální evropský limit pro PFOS a její deriváty v látkách, směsích nebo výrobcích je 10 mg/kg (*Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1021*, 2023).

PFHxS (obr. 2), její soli a příbuzné látky se dostaly do přílohy A Stockholmské úmluvy v roce 2022 (Stockholm Convention, n.d.). Evropská komise 30. května 2023 schválila zařazení těchto látek do Nařízení (EU) 2019/1021 o perzistentních organických znečišťujících látkách s limitem 0,025 mg/kg (25 ng/g) pro PFHxS včetně jejich solí a na 1 mg/kg pro jednotlivé sloučeniny příbuzné PFHxS nebo kombinaci těchto sloučenin v látkách, směsích nebo předmětech (*Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2023/1608*, 2023).



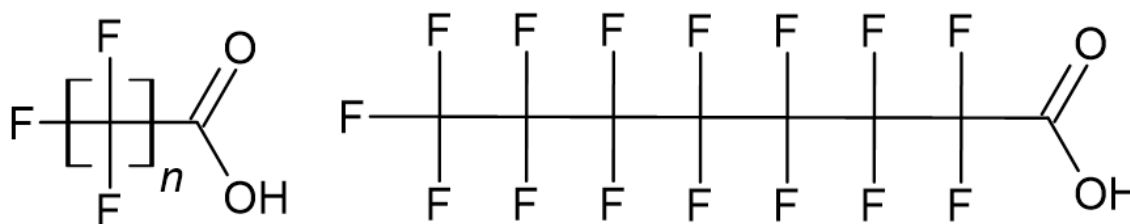
Obrázek 2 – Struktura sloučenin PFHxS a PFOS

5.2 Omezení skupiny PFCA

PFOA (obr. 3) se od roku 2019 nachází na příloze A Stockholmské úmluvy (Stockholm Convention, n.d.). V roce 2020 byla Evropskou komisí schválena mezní hodnota 0,025 mg/kg pro PFOA včetně jejích solí a 1 mg/kg pro jednotlivé sloučeniny příbuzné PFOA nebo kombinaci těchto sloučenin v látkách, směsích nebo výrobcích (*Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2020/784*, 2020).

Ode dne 25. února 2023 jsou legislativně omezeny C9–C14 PFCA kvůli obavě, že by se mohly stát alternativou pro PFOA. Limitní koncentrace byla stanovena na 25 ppb (25 ng/g) pro celkové množství C9–C14 PFCA a jejich solí nebo 260 ppb pro celkové množství látek příbuzných C9–C14 PFCA ve směsích, jako složka jiné látky nebo v předmětech. Nařízení nyní obsahuje několik

výjimky, které jsou buď časově omezeny, nebo mají být Komisí posouzeny (*Nařízení Komise (EU) 2021/1297, 2021*).



Obrázek 3 – Obecná struktura PFCA a struktura PFOA

5.3 Navrhovaná omezení

Dne 22. března 2023 uveřejnila Agentura EU pro chemické látky (ECHA) návrh na komplexní zákaz skupiny PFAS na návrh Německa, Dánska, Nizozemska, Švédska a Norska. Restrikce by se měla týkat látek, které obsahují alespoň jeden plně fluorovaný methyl (CF_3-) nebo methylen (CF_2-). Kromě veškerých sloučenin ze skupin PFSA a PFCA by se na seznamu zakázaných látek objevily i například PFA, SFA nebo i hojně užívaný PTFE. Návrh počítá i výjimkami pro určité sektory (např. lékařské přístroje) primárně kvůli nedostatku technicky a ekonomicky dostupných alternativ, které by aplikaci PFAS nahradily. Tyto výjimky by měly trvat 5, nebo 12 let, na lyžařské vosky se však nevztahuje ani jedna (ECHA, 2023).

6 Funkce PFAS ve voscích a jejich dělení

Obsah PFAS se výrazně liší u různých výrobků. Na základě složení lze lyžařské vosky rozdělit do kategorií znázorněných v tabulce 1.

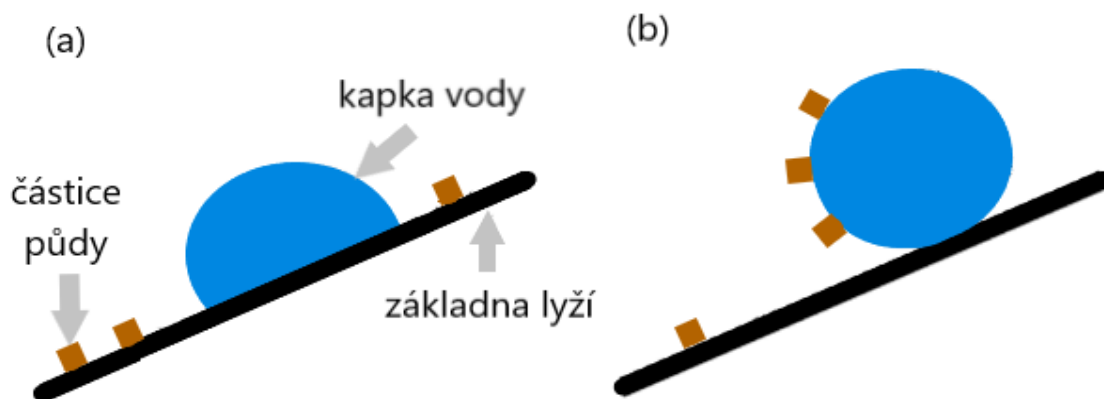
Tabulka 1: Rozdělení lyžařských vosků na základě složení (Nicol et al., 2021)

Obsah PFAS	Složení	Typické značení na obalu
S obsahem PFAS	Pouze PFAS	FC („Fluorocarbon“) nebo Cera
	Vysoký obsah PFAS	HF („High Fluorocarbon“)
	Nízký obsah PFAS	LF („Low Fluorocarbon“)
Bez obsahu PFAS	Uhlovodíky	CH
	Rostlinná báze	Eco

Vosky s obsahem PFAS se obvykle vyskytují ve složení s parafíny (Buck et al., 2011), konkrétní složení se liší v závislosti na teplotě, která mění tvrdost sněhu (Rogowski et al., 2007). Se zvyšující se koncentrací PFAS obecně stoupá cena vosku (Fang et al., 2020).

Cílem užívání vosků je snížení tření na lyžařských skluznicích. Tento efekt má být docílen především díky hydrofobicitě, která snižuje povrchovou energii a zvětšuje kontaktní úhel vůči vodě (Lutz et al., 2023). Po aplikaci fluorovaných vosků bylo prokázáno snížení koeficientu tření mezi ledem a skluznicí. Vosky s obsahem PFAS vykazovaly dokonce lepší vlastnosti v porovnání s vosky na bázi uhlovodíků (Breitschädel et al., 2014; Lutz et al., 2023).

Podle Lutz et al. (2023) se koeficient tření snižuje se zvyšující se koncentrací PFAS. Studie však zahrnovala pouze vosky s obsahem PFAS do 8 % hmotnosti. Výsledky studie Rogowski et al. (2007) ukazují, že neexistuje korelace mezi koncentrací PFAS a vodoodpudivostí, nicméně parafínové vosky s přídavkem PFAS se v každém případě ukázaly jako hydrofóbnější oproti čistě parafínovým voskům. Rozdíl uhlovodíků a fluorovaných látek v odpudivosti vody ukazuje obrázek 4.



Obrázek 4: Schematický náhled chování hydrofobních vosků obsahujících (a) uhlovodíky a (b) fluorované látky na povrchu lyží (upraveno dle Švermová a Černík, 2020)

Lyžařské vosky se vyrábí v různých formách (tab. 2), které se liší především aplikací a dobou účinku. Mezi nejpoužívanější vosky patří bloková forma (Nicol et al., 2021).

Tabulka 2: Přehled forem vosků (upraveno dle Nicol et al., 2021)

Forma vosku	Aplikace	Poznámka
Blok	Vosk nejdříve musí být rozeřtý žehličkou, poté je rovnoměrně nanášen.	Nejběžnější typ vosku, nejdéle vydrží.
Tekutý	Rozetřen po skluznicích kusem látky nebo dodaným aplikátorem.	Kratší doba účinku.
Pastový	Nanesen a rozetřen kusem látky, následně vyleštěn.	Čím delší doba leštění, tím delší doba účinku.
Práškový	Používán až po nanesení několika vrstev vosku ve formě bloku.	Typicky vysoká cena kvůli vysokým koncentracím PFAS.
Sprej	Obvykle nastříkán na několik vrstev blokového vosku.	Často vysoká cena.

7 PFAS v lyžařských voscích

O konkrétních PFAS užívaných v lyžařských voscích se můžeme dozvědět ze dvou patentů podaných dne 2. března 1990. Žádosti podali italská firma Enichem a pan Hertel, výrobce prvního vosku s PFAS (Masia, 2010). Patent Hertela z roku 1990 uvádí PFPE diol jako klíčovou přísadu pro dosažení požadovaných vlastností vosku (Hertel, 1992). Firma Enichem v patentu popsala svoji stěžejní sloučeninu následujícím způsobem: $CF_3C_nF_{2n}C_mH_{2m}CH_3$, kde: $n = 1-21$; $m = 3-25$; $n + m \geq 18$; přičemž řetězec atomů uhlíku je buď lineární nebo rozvětvený (Traverso a Rinaldi, 1993).

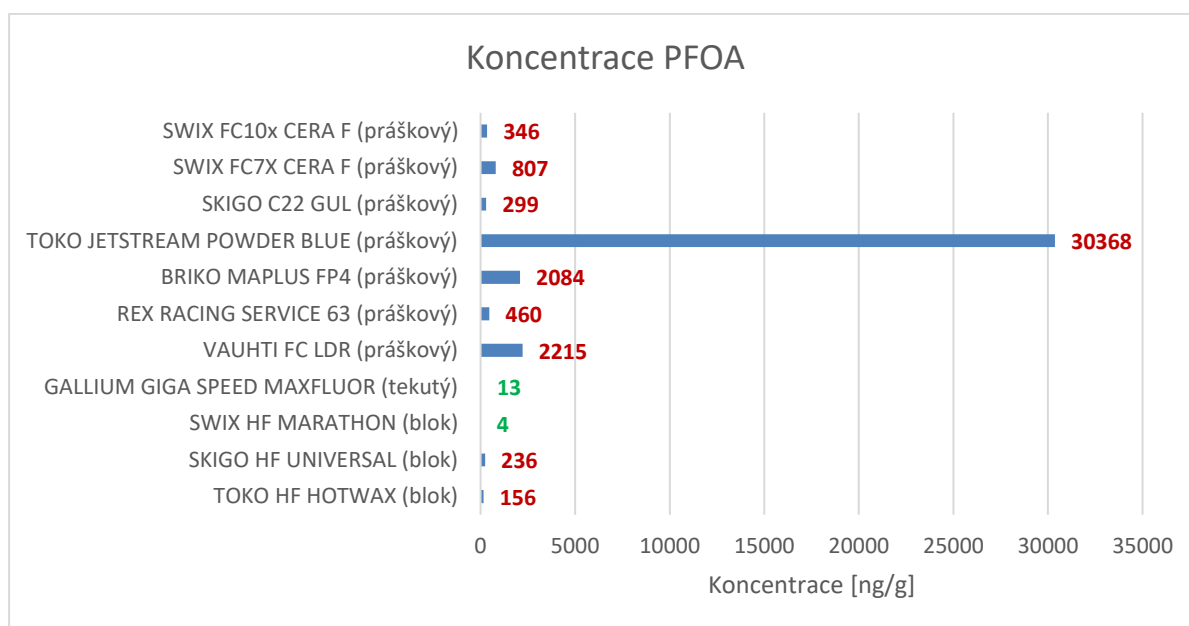
Hlavními PFAS v současných voscích jsou především SFA (Buck et al., 2011; Plassmann a Berger, 2010) a PFA (Rogowski et al., 2005). SFA se ukázala jako ideální skupina pro blokové vosky, jelikož jejich uhlovodíková část se dobře mísí s parafíny, které představují důležitou součást blokových vosků (Nilsson, 2012). PFA lze očekávat především v práškových voscích (Freberg et al., 2014).

Dalšími významnými skupinami jsou PFSA a PFCA (Kotthoff et al., 2015). Odborná literatura se zaměřuje více na skupinu PFCA, což může být dáno mnohonásobně vyššími koncentracemi ve voscích oproti PFSA. V porovnání vůči SFA jsou nicméně koncentrace PFCA nízké a předpokládá se, že se jedná nečistoty z výroby a neslouží žádné technické funkci (Fang et al., 2020). Příklady sloučenin z jednotlivých analyzovaných skupiny jsou v tabulce 3.

Tabulka 3: Vybrané konkrétní sloučeniny analyzované ve voscích

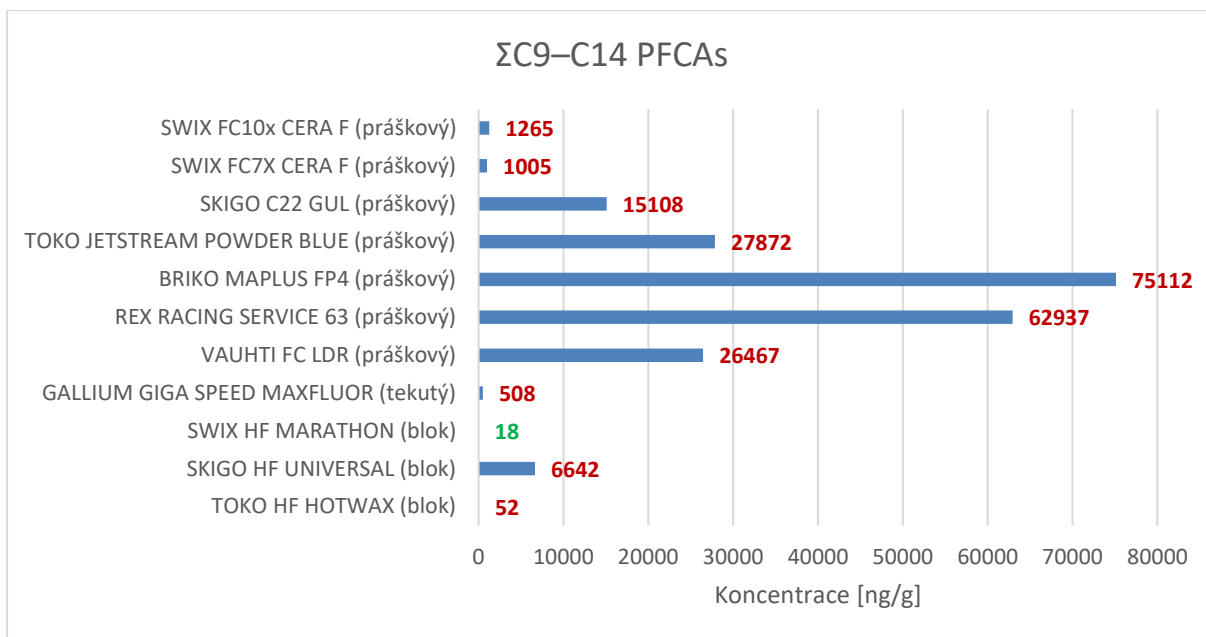
Skupina	Některé nalezené sloučeniny	Zdroj
SFA	F_6H_{16} , $F_{10}H_{16}$, $F_{12}H_{16}$, $F_{14}H_{16}$, $F_{16}H_{16}$	Plassmann a Berger, 2010
PFA	$C_{16}F_{34}$, $C_{14}F_{30}$, $C_{18}F_{38}$	Freberg et al., 2014
PFSA	PFOS, PFBS, PFHxS, PFHpS	Kotthoff et al., 2015
PFCA	PFOA, PFDA, PFNA, PFDODA	Kotthoff et al., 2015

Je třeba uvést, že všechny zde prezentované studie koncentrací PFAS byly zpracovány před datem platnosti recentních evropských legislativ ohledně PFAS. Nejnovější práce se zabývala složením vosků dostupných v létě 2019 v Norsku. 9 z 11 analyzovaných vosků nesplňovaly podmínky evropského limitu PFOA 25 ng/g, který vešel v platnost 4. července 2020 (Fang et al., 2020). Výsledky analýzy jsou znázorněny na obrázku 5.



Obrázek 5: Zjištěné koncentrace PFOA ve voscích (Fang et al., 2020)

Z obrázku 6 lze vyčíst, že podmínky evropského limitu na sumu koncentrací C9-C14 PFCA do 25 ng/g by s tehdejším složením dnes splnil pouze vosk SWIX HF MARATHON, u kterého byla naměřena i podlimitní hodnota koncentrace PFOA (Fang et al., 2020).



Obrázek 6: Suma zjištěných koncentrací C9–C14 PFCA ve voscích (Fang et al., 2020)

Konzentrace PFHxS a PFOS se pohybovala mezi 0,2 až 5,6 ng/g a 0,2 až 3 ng/g, u většiny produktů dokonce nebyly tyto sloučeniny ani nalezeny (Fang et al., 2020). Z legislativního hlediska se tyto hodnoty pohybují pod limitem.

Při dohledávání dostupnosti zkoumaných vosků ve Fang et al. (2020) lze vidět jistou změnu trhu. Na webových stránkách firem Swix a Toko vosky zmíněné ve studii již nejsou v prodeji, obě společnosti se rozhodly přestat vyrábět jakékoliv produkty s obsahem fluoru (Swix, n.d.; Toko, 2022). U vosku Rex Racing Service 63 výrobce uvádí, že momentální složení je bez obsahu PFOA (Rex, n.d.). Vosky Briko Maplus FP4, Gallium Giga Speed Maxfluor, Skigo HF Universal a Skigo C22 GUL byly nalezeny na stránkách výrobce (Gallium, n.d.; Maplus, n.d.; Skigo, n.d., n.d.), nelze však ověřit, jestli je složení stejné, nebo se změnilo. Vosk Vauhti FC LDR nebyl dohledán. V potaz byly brány pouze oficiální webové stránky výrobců.

8 Expozice při užívání lyžařských vosků

8.1 Vznik aerosolů a PFAS ve vzduchu

Aerosol lze z hlediska vstupu do lidského těla rozdělit na tři frakce: vdechovatelná, thorakální a respirabilní. Vdechovatelný aerosol tvoří částice o aerodynamickém průměru (d_a) \leq 100 μm , dostává se do nosní a ústní dutiny při dýchání. Thorakální frakce se počítá od $d_a \leq 28 \mu\text{m}$, částice pronikají za hrtan a mají vliv například na astma nebo na vznik rakoviny plic. Respirabilní aerosol sestává z částic o $d_a \leq 10 \mu\text{m}$. Tato frakce proniká až do plicních sklípků a hraje důležitou roli například při vzniku pneumokoniózy (Nieboer et al., 2005).

Již roce 1992 bylo zjištěno, že při voskování lyží vznikají částice menší než 1 μm (Dahlqvist et al., 1992), jedná se tak o respirabilní frakci aerosolu. Hämeri et al. (1996) došel ke stejnému závěru, velikostní rozpětí částic vznikajících při aplikaci práškového vosku stanovil na 0,1 až 1 μm . Pozdější studie aerosolu ze stejné formy vosku uvádí velikost částic v rozmezí 10 až 487 nm. Tento rozdíl může být dán různými podmínkami experimentů, metodami měření nebo rozdílným složením zkoumaných vosků (Freberg et al., 2013).

Hämeri et al. (1996) dále uvádí, že s přibývajícím časem roste velikost částic. Tento trend byl později pozorován u práškového i blokového vosku. U blokového vosku byl zaznamenán rychlejší růst. Dalším rozdílem mezi těmito formami byly znatelně vyšší koncentrace dýchatelného a vdechovatelného aerosolu u práškového typu (18.6 až 32.3 mg/m^3) oproti blokovému (0.3 až 0.4 mg/m^3) (Freberg et al., 2013).

Vznikající aerosol obsahuje perfluorované látky. V letech 2007–2008 byl proveden odběr vzorků vzduchu z voskovacích kabin na Světovém poháru v Norsku, analýza potvrdila přítomnost sloučenin C4–C14 PFCA v aerosolu. Nejvyšší koncentrace byly naměřeny u PFTeDA: 5–111 (medián: 33) ng/m^3 v respirabilní frakci, 5–163 (medián: 44) ng/m^3 v thorakální frakci a 5–201 (medián: 48) ng/m^3 ve vdechovatelné frakci, pro PFOA pak v těchto frakcích činily hodnoty koncentrace 8–38 (medián: 11) ng/m^3 v respirabilní frakci, 10–44 (medián: 12) ng/m^3 v thorakální frakci a 11–52 (medián: 14) ng/m^3 ve vdechovatelné frakci (Freberg et al., 2010).

Analýzu vzdušných vzorků z kabin Světového poháru provedli i Nilsson et al. (2013), soutěže probíhaly mezi lety 2007–2010. Studie uvádí nejvyšší koncentrace u PFHxA a to 0,03–309 (ar. průměr: 78,6) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ v respirabilní frakci a 1,39–334 (ar. průměr 0,99) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve vdechovatelné

frakci, pro PFOA byly stanoveny koncentrace 0,62–26,8 (ar. průměr: 9,91) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 2,11–52,8 (ar. průměr: 16) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Oproti předešlým hodnotám se jedná o značné navýšení, který může být dát rozdílným přístupem k odběru vzorků.

PFCA se vyskytují v domácím i venkovním vzdušném prostředí, koncentrace záleží však na lokalitě, kde odběr vzorků probíhá. Ve vzduchu v domácím prostředí ve Vancouveru v Kanadě se mezi dominantní řadily PFOA, PFHxA a PFHpA s geometrickými průměry 28, 9,7 a 5,1 pg/m^3 (Shoeib et al., 2011). V norské obci Tromsø pak převládaly PFHpA a PFOA s koncentracemi 17,1 a 4,4 pg/m^3 (Barber et al., 2007), v Katalánsku ve Španělsku byla nejvyšší hodnota 62 pg/m^3 u PFBA (Ericson Jogsten et al., 2012). Venkovnímu prostředí dle Barber et al. (2007) jednoznačně dominovala PFOA s 341 pg/m^3 v Manchesteru a 552 pg/m^3 v Hazelriggu ve Velké Británii, v Katalánsku se dle Ericson Jogsten et al. (2012) hodnoty PFOA pohybovaly mezi 6–20 pg/m^3 . Z těchto údajů lze uvažovat, že vzdušné PFCA vznikající při voskování podstatně překračují běžné koncentrace.

Zdaleka nejvyšší koncentrace při voskování byly zjištěny u 8:2 FTOH, sloučenina byla detekována pouze v plynné fázi s hodnotami 0,834–997 (ar. průměr: 114) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Nilsson et al., 2013a). V domácím prostředí v Katalánsku se 8:2 FTOH pohybovala mezi 7,5–170 (ar. průměr: 51) pg/m^3 , ve venkovním prostředí pak mezi 0,21–1,7 pg/m^3 (Ericson Jogsten et al., 2012). V domovech ve Vancouveru se geometrický průměr koncentrací 8:2 FTOH dostal na hodnotu 2900 pg/m^3 (Shoeib et al., 2011).

8.2 Plicní onemocnění související s aplikacemi vosků

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH – Americká konference vládních průmyslových hygieniků) stanovila pracovní prahový limit 8hodinového váženého průměru 10 mg/m^3 pro vdechovatelný aerosol a 3 mg/m^3 pro respirabilní aerosol. Pro výpary parafínového vosku je tato hodnota snížena 2 mg/m^3 (Nilsson et al., 2013a). ACGIH dále uvádí pracovní expoziční limit 0,01 mg/m^3 pro amonnou sůl PFOA (Smith et al., 2023), pro jiné PFAS nebyly limity nalezeny.

Již dříve byly zaznamenány stížnosti voskovačů na dušnost a podráždění nosu a dýchacích cest (Dahlqvist et al., 1992). Liesivuori et al. (1994) uvádí jako pravděpodobné, že přítomnost

fluorovaných látek má na respirační problémy vliv. Bylo zjištěno, že po voskování po dobu 2–3 hodin dochází ke snížení plicní funkce. Při studii byly však použity i vosky bez obsahu PFAS (Dahlqvist et al., 1992), nelze tak uvést fluorované sloučeniny jako jedinou příčinu respiračních symptomů. Voskování parafínovým i fluorovaným voskem po dobu 45 minut ve špatně větrané místnosti však podle Hoffman et al. (1997) nemělo zásadní vliv na akutní plicní problémy.

Studie ohledně chronických onemocnění voskovačů nejsou dostupné. Dlouhodobé pracovní vystavení PFAS vedlo například k pneumokonióze (Lee et al., 2018) nebo intersticiální plicní fibróze (Butnor et al., 2020). Vzhledem k rozdílným pracovním poměrům, hlavně pak sezónním charakterem lyžování, je ale otázkou, zde lze tyto případy porovnávat.

V souvislosti s voskem Swix Cera F (s vysokým obsahem PFAS) byly zaznamenány 2 případy nutnosti hospitalizace. V prvním případě šlo zjevně o chybu voskovače, který si po aplikaci vosku neumytýma rukama zapálil cigaretu. Po dušnosti a příznakům podobným chřipce byl převezen do nemocnice, kde byl rentgenem zjištěn alveolární edém (Strøm a Alexandersen, 1990). V druhém případě šlo opět o kuřáka, během procesu voskování však nekouřil. Hospitalizován byl s podobnými příznaky a byla mu naměřena snížená funkce plic (Hansen, 1991).

Případová studie z roku 1998 naznačuje přímou spojitost fluorovaných látek z vosku s plicními problémy. 60letý muž byl převezen do nemocnice po navoskování 40 párů lyží, léčen byl pro vysokohorský plicní edém. Autoři však tuto možnost vyvracejí s tím, že pacient byl na vysoké nadmořské výšky zvyklý (Bracco a Favre, 1998).

8.3 PFAS v krvi voskovačů

Haug et al. (2011) zjišťovali expozici PFAS u norských žen. Přestože ve většině případů bylo hlavním zdrojem jídlo, tak pro některé představovalo vnitřní vzdušné prostředí až 50 % celkového příjmu. Studie provedená na potkanech potvrdila nárůst PFOA v plazmě po expozici jejích aerosolových frakcí (Gustafsson et al., 2022). Vzhledem k vyšším koncentracím PFAS produkovaných do vzduchu při voskování, jak bylo zmíněno výše, lze očekávat i zvýšené koncentrace v krevním séru voskovačů.

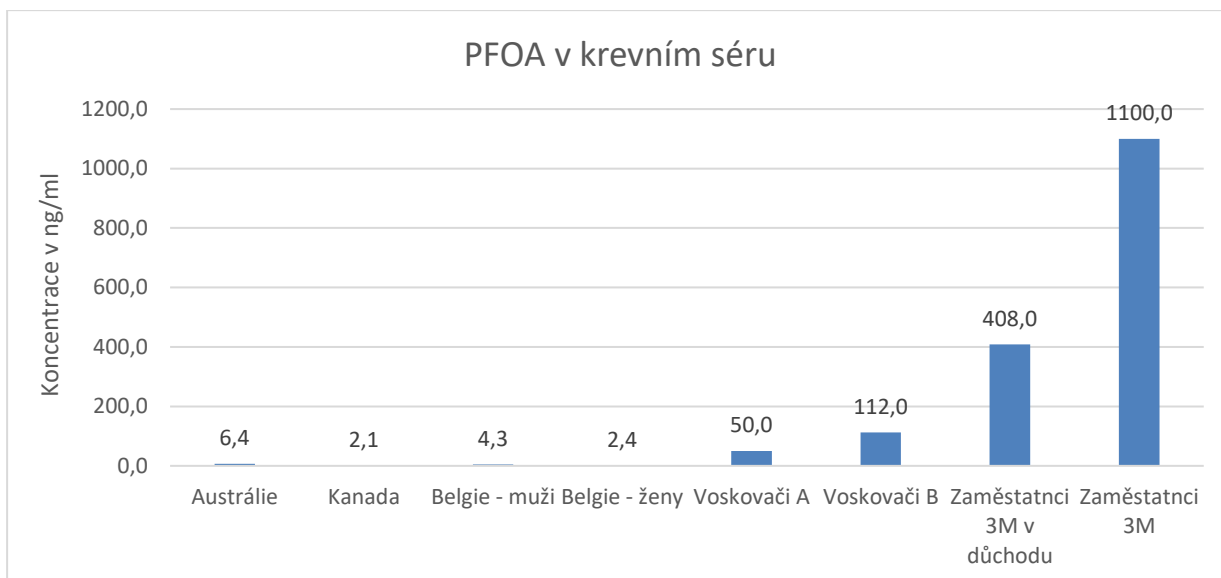
Touto problematikou se do dnešního dne zabývalo několik studií. Freberg et al. (2010) zjistili nevyšší koncentrace u PFOA, PFNA a PFOS. U těchto třech sloučenin byla pozorována

nejnižší redukce v krevním séru mezi lyžařskými sezónami. PFOA dosáhla hodnot 20–174 (medián: 50) ng/ml po sezóně v březnu roku 2008, 15–173 (medián: 53) ng/ml před sezónou v listopadu roku 2008 a 20–162 (medián: 57) ng/ml po sezóně březnu roku 2009.

Dle Nilsson et al. (2010) byly sérové koncentrace voskovačů také nejvyšší u PFOA, konkrétně 4,8–535 (medián: 112) ng/ml, pozdější práce Nilsson et al. (2013b) měla obdobné výsledky – medián pro PFOA činil 110 ng/ml. Nilsson et al. (2010) dále říká, že důležitá byla i počáteční hodnota v krvi. Nižší původní koncentrace <10,0 ng/ml později znamenala znatelný nárůst, kdežto koncentrace >100 ng/ml byly i po expozici při voskování v podstatě konstantní.

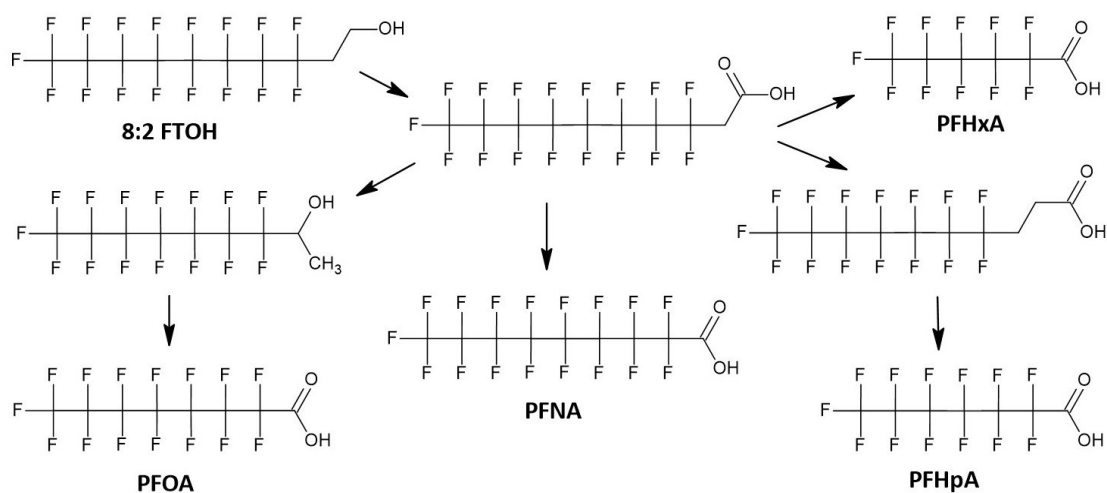
Vzhledem k všudypřítomnosti PFAS se tyto sloučeniny běžně vyskytují v krvi obecné populace. V Austrálii byl změřen medián koncentrace PFOA 6,4 ng/ml (Toms et al., 2009), v Kanadě 2,13 ng/ml (Monroy et al., 2008), v Belgii 2,4 ng/ml u žen a 4,3 ng/ml u mužů (Kannan et al., 2004). Na základě těchto informací lze konstatovat, že v séru voskovačů se nachází zvýšené úrovně PFOA. Kromě PFOA byly v krvi voskovačů zjištěny zvýšené koncentrace i u PFNA. Nálezy PFOS a PFHxS u voskovačů byly porovnatelné s obecnou populací (Nilsson et al., 2010).

Zdaleka největší expozici PFAS čelí pracovníci ve výrobě fluorovaných sloučenin. Dle Olsen a Zobel (2007) medián PFOA v krvi zaměstnanců firmy 3M dosáhl hodnoty 1100 ng/ml. Značně vysoké úrovně PFOA byly zjištěny i u zaměstnanců stejné firmy, kteří již odešli do důchodu, medián činil 408 ng/ml (Olsen et al., 2007). Koncentrace v krvi voskovačů je pak vzhledem k těmto údajům relativně nízká. Porovnání koncentrací v séru běžné populace, voskovačů a pracovníků ve výrobě PFAS je znázorněno na obrázku 7.



Obrázek 7: Medián koncentrace PFOA zjištěné v krvi běžné populace, voskovačů ze dvou různých studií a zaměstnanců firmy 3M (Freberg et al., 2010; Monroy et al., 2008; Nilsson et al., 2010; Olsen et al., 2007; Olsen a Zobel, 2007; Toms et al., 2009)

Jak již bylo zmíněno, 8:2 FTOH byl nejkoncentrovanější sloučeninou ve vzduchu při voskování (Nilsson et al., 2013a). Testy ukázaly, že mezi metabolity 8:2 FTOH (obr. 8) patří mimo jiné PFOA (Huang et al., 2019) a v menší míře také PFNA (Martin et al., 2005), PFHxA (Zhang et al., 2013) a PFHpA (Yu et al., 2016). Dle Nabb et al. (2007) se v lidských jaterních buňkách pouze 0,012% 8:2 FTOH metabolizovalo na PFOA. I přes nízkou míru biotransformace Nilsson et al. (2013b) naznačuje, že značně navýšené koncentrace 8:2 FTOH ve vzduchu má za následek vyšší úrovně PFCA v krvi voskovačů.



Obrázek 8: Biotransformace 8:2 FTOH na PFHxA, PFHpA, PFOA a PFNA (upraveno dle Nilsson, 2012; Zhang et al., 2021)

9 Perzistence v životním prostředí

PFAS jsou vysoce perzistentní chemickou skupinou (Cousins et al., 2019). Vedle lidského těla byly nalezeny také například v rybách (Goodrow et al., 2020; Semerád et al., 2022), v půdě (Brusseau et al., 2020), v oceánech (González-Gaya et al., 2019; Yamazaki et al., 2021) nebo ve vzduchu (Kim a Kannan, 2007). Lze očekávat, že lyžařské vosky s obsahem PFAS mají přímý vliv na znečišťování prostředí těmito látkami v místech užívání.

Plassmann a Berger (2013) měřil úrovně C6–C22 PFCA ve vzorcích sněhu odebraných kolem závodní tratě ve Švédsku. Všechny analyzované látky byly zaznamenány ve vyšších koncentracích oproti kontrolnímu vzorku. Pozdější švédská studie zjistila znatelný nárůst výskytu PFCA (Hanssen et al., 2019). Dle Plassmann a Berger (2013) byla suma C6–22 PFCA ve třetím kilometru tratě 1380 ng/l (voda z roztátého sněhu), dle Hanssen et al. (2019) hodnota sumy C5–C14 PFCA dosáhla 3560 ng/l. Značné koncentrace C12–C14 PFCA byly analyzovány i na lyžařské trati v Maine v USA. Suma C12–C14 PFCA se zde vyšplhala na 5234 ng/l v prvním vzorku a 7010 ng/l v druhém vzorku, oba vzorky byly odebrány kolem startovní čáry. Kontrolní sníh v této studii obsahoval pouze 4,08 ng/l PFDODA a 10,4 ng/l PFTeDA (Carlson a Tupper, 2020). Vedle PFCA byly ve sněhu zjištěny i SFA (Plassmann a Berger, 2010).

Zvýšená přítomnost PFAS byla zaznamenána také v půdě v lyžařských oblastech (Carlson a Tupper, 2020; Grønnestad et al., 2019; Plassmann a Berger, 2013, 2010). Dle Plassmann a Berger (2013) nejvyšší koncentrace sumy C6–22 PFCA dosáhla 19,1 ng/g, suma C10–14 PFCA byla dle Carlson a Tupper (2020) 3,72 ng/g a 10,34 ng/g. Plassmann a Berger (2013) kromě kontaminovaného sněhu zmiňuje atmosférickou depozici jako možný podstatný zdroj PFAS v půdě kolem lyžařských tratí.

Dále dochází k akumulaci PFAS v biotě. Dle Herzke et al. (2017, 2015) je množství PFAS v žížalách z lyžařské oblasti zjevně vyšší oproti ostatním oblastem. Grønnestad et al. (2019) sice říká, že žížaly z okolí lyžařských tratí mají také vyšší množství PFAS v těle, nejedná se však již o tak zřetelný rozdíl ve srovnání vůči referenčním žížalám. Jiná situace ale nastává u norníků rudých (*Myodes glareolus*). U tohoto hlodavce koncentrace PFAS dosáhla hodnoty 15,6 ng/g v lyžařské oblasti, v referenční pak pouze 2,74 ng/g (Grønnestad et al., 2019).

Chropeňová et al. (2016) přisuzuje kontaminaci jehličí fluorovanými látkami mimo jiné lyžařským voskům. Jehličí bylo odebráno z okolí lyžařských tratí v Norsku a na Slovensku. Norské vzorky obsahovaly obecně méně PFAS, především pak PFOA, která byla v té době v Norsku již omezovaná, kdežto na Slovensku nikoliv.

10 Historický pohled, aktuální situace a budoucnost

První vosky se vyráběly z přírodních produktů, jako například borovicový dehet. V roce 1913 vytvořil norský výrobce lyží Peter Østbye formuli s obsahem parafinů, díky kterému pak vyhrál závod nad tehdejším favoritem. V dalších letech začaly vznikat firmy, které se výrobou vosků zabývají do dnešních dnů – v roce 1940 Toko a v roce 1946 Swix. Celý tento průmysl od začátku držel své postupy výroby v tajnosti, jelikož vosk se stal jedním z hlavních nástrojů, jak vyhrávat soutěže (Masia, 2010).

Terry Hertel, nadšený lyžař ze San Francisca, se v roce 1974 snažil přijít s novým složením lyžařských vosků. Zásadní však pro něj bylo setkání s chemikem ze společnosti 3M, který mu nabídl perfluorované látky ve formě tekutiny, které firma prodávala. V roce 1986 pak pan Hertel představil vosk s názvem Racing 739, který se dá považovat za první vosk s obsahem PFAS (Masia, 2010). Další produkty rychle následovaly. V roce 1987 přišla firma Swix s voskem Cera F (Nilsson, 2012), o rok později pak firma Salomon s voskem F4 (Masia, 2010). V roce 1990 byly podány 2 patenty ohledně výroby vosků s perfluorovanými látkami (Hertel, 1992; Traverso a Rinaldi, 1993).

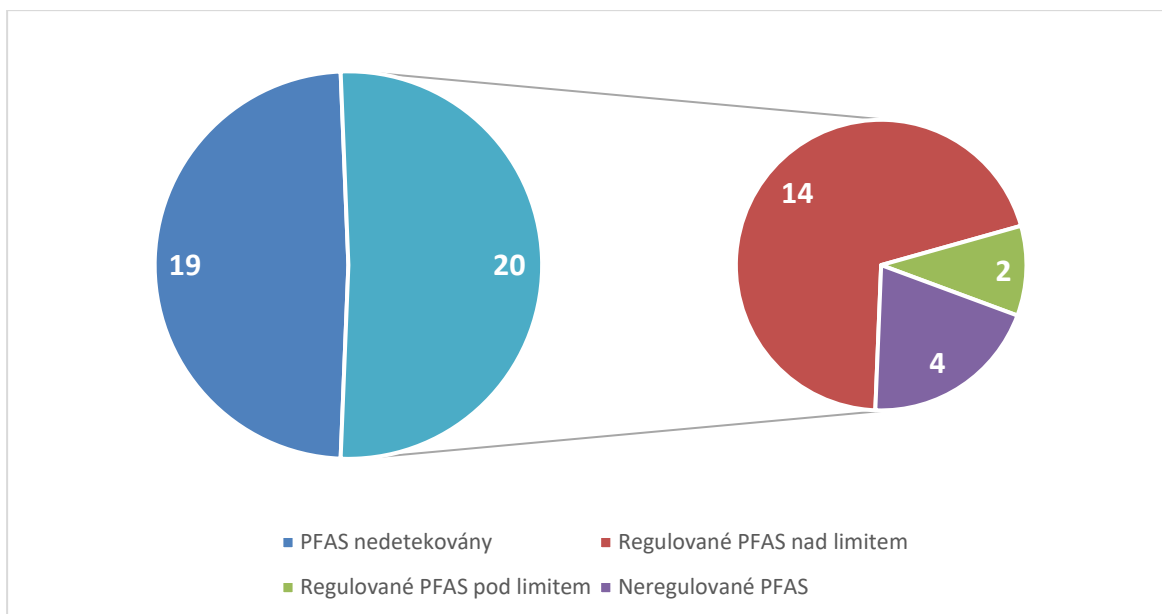
Vosky na bázi PFAS si postupně získávaly přízeň. V roce 1990 se dle odhadů v Evropském hospodářském prostoru (EHP) vyrobilo 15 tun těchto vosků, v roce 1995 výroba stoupla na 40,5 tuny. Přestože od roku 2000 celosvětová výroba lyžařských vosků klesá, do roku 2010 si vosky s perfluorovanými látkami držely 50% podíl. Tento podíl klesá až od roku 2015 (Nicol et al., 2021). Důvodem k takovému poklesu mohlo být zvyšující povědomí o negativních důsledcích PFAS, které mohlo pramenit například ze založení vědeckého panelu C8 (viz podkapitola Vliv PFAS na zdraví) (Steenland et al., 2020).

Mezinárodní lyžařská federace (FIS) ve spolupráci s Mezinárodní biatlonovou unií (IBU) vytvořila efektivní testovací metody, které odhalují přítomnost fluoru ve vosku. V nastávající sezóně 2023/2024 platí kompletní zákaz užívání těchto vosků na závodech pod hlavičkami těchto společností (International Ski Federation, 2023). Pro voskařské firmy to znamená snížení odbytu produktů s PFAS. Vedle zpříšňující legislativy, která nutí společnosti změnit výrobní procesy, tak lze očekávat další snižování výroby vosků s perfluorovanými látkami.

Dle Nicol et al. (2021) se v roce 2020 vyrobilo v EHP necelých 22 tun vosků s PFAS a každý následující rok se odhaduje snížení výroby o 8 % vůči předešlému roku. V roce 2030 se produkce odhaduje na 4,3 tuny, oproti roku 2020 to znamená pokles o 80 % (Nicol et al., 2021).

Podle dotazníkového výzkumu jsou pro firmy vyrábějící lyžařský vosk důležité otázky životního prostředí (Švermová a Černík, 2020). Příkladem v tomto ohledu jdou společnosti Swix a Toko, které nyní již nevyrábí vosky ani jiné produkty s obsahem PFAS (Toko, 2022). Swix však uvádí, že na trhu lze stále jejich předešlé výrobky nalézt, jedná se však o nabídku jiných prodejců (Swix, n.d.). Další výrobci, např. Vauhti (Vauhti, n.d.), Gallium (Gallium, n.d.) nebo Rex (Rex, n.d.), nabízí na svých webových stránkách také vosky bez PFAS nejčastěji s označením „fluor free“. Stejně označení dnes nese i první vosk s perfluorovanými látkami Racing 739, od sezóny roku 2020 je dokonce podle výrobce plně rozložitelný (Hertel Ski Wax, n.d.).

V jakém stavu se nachází momentální trh s lyžařskými vosky, ukázalo šetření provedené mezi lety 2020 a 2021 v Dánsku, Švédsku, Finsku, Norsku a na Islandu. Ze všech prověřovaných kategorií, mezi které patřilo například i oblečení, hasící přístroje nebo přípravky na auta a lodě, se lyžařské vosky ukázaly jako nejproblematictější skupina, u které bylo detekováno největší množství produktů se zákonem omezenými PFAS. Z 20 vosků, ve kterých byly PFAS detekovány, 14 nesplňovaly legislativní limity pro PFOA nebo PFOS. Šetření však poukázalo i na fakt, že na trhu se nabízí i „fluor free“ vosky (Talasniemi et al., 2022). Výsledky šetření jsou znázorněny na obrázku 9.



Obrázek 9: Výsledky šetření přítomnosti PFAS v lyžařských voscích v Dánsku, Švédsku, Finsku, Norsku a na Islandu provedené v letech 2020–2021 (Talasniemi et al., 2022). Čísla představují počty příslušných produktů.

Dle odhadů se v EHP v roce 2020 použilo na výrobu lyžařských vosků přibližně 1,6 tuny PFAS (ECHA, 2023; Nicol et al., 2021). Například výrobu obalů a materiálů přicházejících do kontaktu s potravinami se spotřeba odhaduje na nejméně 18 597 tun, u lékařských přístrojů alespoň 24 672 tun (ECHA, 2023). Na základě těchto informací lze konstatovat, že průmysl zaměřující se na lyžařské vosky není signifikantním zdrojem celkových emisí PFAS. Roční emise PFAS z vosků do životního prostředí se pohybují okolo 1 tuny (ECHA, 2023; Nicol et al., 2021). Problém však představuje fakt, že tyto emise jsou koncentrovány především na lyžařských tratích, tedy na poměrně malém území a převážně v přírodním prostředí, a že v téměř celkovém množství vstupují, nebo mohou vstoupit do životního prostředí.

11 Závěr

PFAS jsou perzistentní sloučeniny spojované s výskytem rakoviny, negativním vlivem na vývoj dětí, narušováním činností hormonů a hepatotoxicitou. Z těchto závažných důvodů jsou některé perfluorované látky omezovány Stockholmskou úmluvou a legislativou Evropské unie, jedná se však pouze o zlomek z celkového počtu tisíců PFAS. Existuje ale také návrh na komplexní zákaz PFAS. Vzhledem ke značné prodlevě při schvalování restrikcí PFAS v minulosti je ovšem otázkou, zdali má šanci takový zákaz vejít v platnost v dohledné době.

Konkrétní PFAS vyskytující se v lyžařských voscích je náročné určit, což je dáno minimálními, nebo žádnými informacemi od výrobců a malým počtem standardů pro analýzu. Za hlavní PFAS se voscích se považují SFA a PFA, PFCA a PFSA pak představují nejspíše reziduální zbytky z výroby. Jsou to však právě PFCA a PFSA, kterým legislativa udává limity ve výrobcích. Dle dat z roku 2019 by dnešní limit 25 ng/g platícím pro PFOA nesplňovalo 9 z celkových 11 analyzovaných vosků, podlimitní hodnoty 25 ng/g sumy koncentrací C9–C14 PFCA byly zjištěny pouze u jednoho vosku. Omezení C9–C14 PFCA nyní platí však pouze několik měsíců a je třeba dalších analýz vosků vyhodnocujících plnění tohoto zákazu.

Při aplikaci lyžařských vosků byly ve vzduchu změřeny zvýšené koncentrace FTOH a PFCA oproti běžným hodnotám venkovního a domácího vzdušného prostředí. Některé zdroje dávají tuto expozici voskovačů do souvislosti s plicními onemocněními, důkazy jsou však omezené. Odborná literatura také poukazuje na korelaci se zvýšenými úrovněmi PFCA v krvi voskovačů. Hodnoty PFOA běžné populace se pohybují v jednotkách ng/ml, voskovačů v desítkách až stovkách ng/ml a u pracovníků z výroby fluorovaných látek ve stovkách až tisících ng/ml. Voskovači tedy nepředstavují nejexponovanější skupinu, vzhledem k nedostatku dat k mechanismu toxicity mohou být ale jakkoliv zvýšené úrovně PFAS v séru považované za nebezpečné. Lze předpokládat, že složení vosků budou mít vliv na koncentrace PFAS ve vzduchu při aplikaci a v krvi voskovačů. Data těchto koncentrací jsou ovšem 10 a více let stará, je tedy zapotřebí dalších výzkumů s recentním složením vosků.

V lyžařských oblastech představují vosky hlavní zdroj PFAS do prostředí. Oproti kontrolním vzorkům se zde byly změřeny zvýšené úrovně ve sněhu, půdě, zvířatech i na rostlinách. Celkové emise PFAS z lyžařských vosků jsou sice ve srovnání s jinými zdroji poměrně nízké, avšak lze

předpokládat, že se koncentrují na malém území lyžařských oblastí, což lze považovat za environmentální problém.

FIS a IBU na následující sezónu 2023/2024 vyhlásila kompletní zákaz vosků s PFAS. Dle vyjádření disponují efektivními metodami pro vymáhání tohoto zákazu. Analýza PFAS je však obecně nesnadná a velice omezená, což může vést k určitým pochybnostem o údajné efektivitě. Na trhu je nyní dostupná celá řada alternativních vosků bez obsahu PFAS, které je možno na závodech používat. Společnosti Swix a Toko kompletně ukončily výrobu produktů s fluorovanými látkami, „fluor free“ vosky nabízí i další velcí výrobci. Šetření provedené v období 2020–2021 však odhalilo také množství vosků, které vzhledem k legislativním restrikcím EU měly být již z trhu staženy.

V následujících letech se v EHP očekává značné utlumení výroby vosků s obsahem PFAS. Dle odhadů se v roce 2030 vyprodukuje těchto vosků o 80 % méně, než tomu bylo v roce 2020. Zda se tyto předpoklady naplní, může být předmětem dalšího zkoumání. Ze zemí mimo EHP je velice malé, nebo žádné množství dat a informací o problematice PFAS v lyžařských voscích. V rámci EU se celou problematikou zabývají především severské státy a jdou tak příkladem ostatním zemím.

12 Zdroje

- Al Amin, Md., Sobhani, Z., Liu, Y., Dharmaraja, R., Chadalavada, S., Naidu, R., Chalker, J.M., Fang, C., 2020. Recent advances in the analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)— A review. *Environ. Technol. Innov.* 19, 100879. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100879>
- Barber, J.L., Berger, U., Chaemfa, C., Huber, S., Jahnke, A., Temme, C., Jones, K.C., 2007. Analysis of per- and polyfluorinated alkyl substances in air samples from Northwest Europe. *J. Environ. Monit.* 9, 530–541. <https://doi.org/10.1039/B701417A>
- Bracco, D., Favre, J.-B., 1998. Pulmonary Injury After Ski Wax Inhalation Exposure. *Ann. Emerg. Med.* 32, 616–619. [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(98\)70043-5](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(98)70043-5)
- Breitschädel, F., Haaland, N., Espallargas, N., 2014. A Tribological Study of UHMWPE Ski Base Treated with Nano Ski Wax and its Effects and Benefits on Performance. *Procedia Eng., The Engineering of Sport* 10 72, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.048>
- Brusseau, M.L., Anderson, R.H., Guo, B., 2020. PFAS concentrations in soils: Background levels versus contaminated sites. *Sci. Total Environ.* 740, 140017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140017>
- Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., de Voogt, P., Jensen, A.A., Kannan, K., Mabury, S.A., van Leeuwen, S.P., 2011. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 7, 513–541. <https://doi.org/10.1002/ieam.258>
- Butnor, K.J., Covington, J., Taatjes, D.J., DeWitt, J., Von Turkovich, M.A., 2020. Fluorine detection in the lung tissue of a worker with interstitial pulmonary fibrosis and long-term occupational exposure to polytetrafluoroethylene and perfluorooctanoic acid. *Ultrastruct. Pathol.* 44, 496–500. <https://doi.org/10.1080/01913123.2020.1842828>
- C8 Science Panel, 2012. C8 Probable Link Reports [WWW Document]. URL http://www.c8sciencepanel.org/prob_link.html (accessed 8.9.23).

- Carlson, G.L., Tupper, S., 2020. Ski wax use contributes to environmental contamination by per- and polyfluoroalkyl substances. *Chemosphere* 261, 128078. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128078>
- Chropeňová, M., Karásková, P., Kallenborn, R., Gregušková, E.K., Čupr, P., 2016. Pine Needles for the Screening of Perfluorinated Alkylated Substances (PFASs) along Ski Tracks. *Environ. Sci. Technol.* 50, 9487–9496. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02264>
- Coskum, O., 2016. Separation techniques: chromatography. *North. Clin. Istanbul.* 3, 156–160. <https://doi.org/10.14744/nci.2016.32757>
- Costello, E., Rock, S., Stratakis, N., Eckel, S.P., Walker, D.I., Valvi, D., Cserbik, D., Jenkins, T., Xanthakos, S.A., Kohli, R., Sisley, S., Vasiliou, V., La, M.M.A., Rosen, H., Conti, D.V., McConnell, R., Chatzi, L., 2022. Exposure to per- and Polyfluoroalkyl Substances and Markers of Liver Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environ. Health Perspect.* 130, 046001. <https://doi.org/10.1289/EHP10092>
- Cousins, I.T., Ng, C.A., Wang, Z., Scheringer, M., 2019. Why is high persistence alone a major cause of concern? *Environ. Sci. Process. Impacts* 21, 781–792. <https://doi.org/10.1039/C8EM00515J>
- Dahlqvist, M., Alexandersson, R., Andersson, B., Andersson, K., Kolmodin-Hedman, B., Malker, H., 1992. Exposure to Ski-Wax Smoke and Health Effects in Ski Waxers. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*
- Druart, M.L., Chamlou, R., Mehdi, A., Limbosch, J.M., 2001. Repair of Abdominal Wall Defects by Intraperitoneal Implantation of Polytetrafluoroethylene (Teflon®) Mesh, in: Bendavid, R., Abrahamson, J., Arregui, M.E., Flament, J.B., Phillips, E.H. (Eds.), *Abdominal Wall Hernias: Principles and Management*. Springer, New York, NY, pp. 262–265. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8574-3_34
- ECHA, 2023. ANNEX XV RESTRICTION REPORT – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) [WWW Document]. URL <https://echa.europa.eu/documents/10162/f71f3bed-e48d-5004-d195-e293c38d0602> (accessed 8.2.23).

- Ellis, D.A., Martin, J.W., Mabury, S.A., Hurley, M.D., Sulbaek Andersen, M.P., Wallington, T.J., 2003. Atmospheric Lifetime of Fluorotelomer Alcohols. *Environ. Sci. Technol.* 37, 3816–3820. <https://doi.org/10.1021/es034136j>
- Ericson Jogsten, I., Nadal, M., van Bavel, B., Lindström, G., Domingo, J.L., 2012. Per- and polyfluorinated compounds (PFCs) in house dust and indoor air in Catalonia, Spain: Implications for human exposure. *Environ. Int.* 39, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.09.004>
- Fang, S., Plassmann, M.M., Cousins, I.T., 2020. Levels of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in ski wax products on the market in 2019 indicate no changes in formulation. *Environ. Sci. Process. Impacts* 22, 2142–2146. <https://doi.org/10.1039/D0EM00357C>
- Fei, C., McLaughlin, J.K., Tarone, R.E., Olsen, J., 2007. Perfluorinated Chemicals and Fetal Growth: A Study within the Danish National Birth Cohort. *Environ. Health Perspect.* 115, 1677–1682. <https://doi.org/10.1289/ehp.10506>
- Freberg, B.I., Haug, L.S., Olsen, R., Daae, H.L., Hersson, M., Thomsen, C., Thorud, S., Becher, G., Molander, P., Ellingsen, D.G., 2010. Occupational Exposure to Airborne Perfluorinated Compounds during Professional Ski Waxing. *Environ. Sci. Technol.* 44, 7723–7728. <https://doi.org/10.1021/es102033k>
- Freberg, B.I., Olsen, R., Daae, H.L., Hersson, M., Thorud, S., Ellingsen, D.G., Molander, P., 2014. Occupational Exposure Assessment of Airborne Chemical Contaminants Among Professional Ski Waxers. *Ann. Occup. Hyg.* 58, 601–611. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu015>
- Freberg, B.I., Olsen, R., Thorud, S., Ellingsen, D.G., Daae, H.L., Hersson, M., Molander, P., 2013. Chemical Exposure among Professional Ski Waxers— Characterization of Individual Work Operations. *Ann. Occup. Hyg.* 57, 286–295. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes077>
- Gallium, n.d. GIGA SPEED Maxfluor (30ml) [WWW Document]. Gallium. URL <https://www.galliumwax.co.jp/shop/catalog/detail/GS3301/> (accessed 6.24.23a).

- Gallium, n.d. Non-fluor Wax [WWW Document]. URL <https://www.galliumwax.co.jp/en/35402/> (accessed 8.2.23b).
- González-Gaya, B., Casal, P., Jurado, E., Dachs, J., Jiménez, B., 2019. Vertical transport and sinks of perfluoroalkyl substances in the global open ocean. *Environ. Sci. Process. Impacts* 21, 1957–1969. <https://doi.org/10.1039/C9EM00266A>
- Goodrow, S.M., Ruppel, B., Lippincott, R.L., Post, G.B., Procopio, N.A., 2020. Investigation of levels of perfluoroalkyl substances in surface water, sediment and fish tissue in New Jersey, USA. *Sci. Total Environ.* 729, 138839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138839>
- Grandjean, P., Andersen, E.W., Budtz-Jørgensen, E., Nielsen, F., Mølbak, K., Weihe, P., Heilmann, C., 2012. Serum vaccine antibody concentrations in children exposed to perfluorinated compounds. *JAMA* 307, 391–397. <https://doi.org/10.1001/jama.2011.2034>
- Grønnestad, R., Vázquez, B.P., Arukwe, A., Jaspers, V.L.B., Jenssen, B.M., Karimi, M., Lyche, J.L., Krøkje, Å., 2019. Levels, Patterns, and Biomagnification Potential of Perfluoroalkyl Substances in a Terrestrial Food Chain in a Nordic Skiing Area. *Environ. Sci. Technol.* 53, 13390–13397. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02533>
- Gustafsson, Å., Wang, B., Gerde, P., Bergman, Å., Yeung, L.W.Y., 2022. Bioavailability of inhaled or ingested PFOA adsorbed to house dust. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 78698–78710. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20829-3>
- Hämeri, K., Aalto, P., Kulmala, M., Sammaljärvi, E., Spring, E., Pihkala, P., 1996. Formation of respirable particles during ski waxing. *J. Aerosol Sci.* 27, 339–344. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)00552-8](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00552-8)
- Hansen, T.L., 1991. Lungeskade i forbindelse med smøring av ski. *Tidsskr Laegeforen* Nr 3 364.
- Hanssen, L., Herzke, D., Nikiforov, V., Moe, B., Nygård, T., van Dijk, J.J., Gabrielsen, G.W., Fuglei, E., Yeung, L., Vogelsang, C., Carlsson, P.M., 2019. Screening new PFAS compounds 2018. NILU.
- Haug, L.S., Huber, S., Becher, G., Thomsen, C., 2011. Characterisation of human exposure pathways to perfluorinated compounds — Comparing exposure estimates with

- biomarkers of exposure. *Environ. Int.* 37, 687–693.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.01.011>
- Hertel Ski Wax, n.d. Racing 739™ 340g/12oz [WWW Document]. Hertel Ski Wax. URL <https://hertelwax.com/products/racing739-high-performance-all-temperature-long-lasting-7-days> (accessed 8.2.23).
- Hertel, T.J., 1992. Ski wax for use with sintered base snow skis. US5114482A.
- Herzke, D., Nygård, T., Heimstad, E.S., 2017. Environmental pollutants in the terrestrial and urban environment 2016. NILU.
- Herzke, D., Nygård, T., Heimstad, E.S., Uggerud, H.T., 2015. Environmental pollutants in the terrestrial and urban environment 2014.
- Hoffman, M.D., Clifford, P.S., Varkey, B., 1997. Acute effects of ski waxing on pulmonary function. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29, 1379.
- Huang, M.C., Robinson, V.G., Waidyanatha, S., Dzierlenga, A.L., DeVito, M.J., Eifrid, M.A., Gibbs, S.T., Blystone, C.R., 2019. Toxicokinetics of 8:2 fluorotelomer alcohol (8:2-FTOH) in male and female Hsd:Sprague Dawley SD rats after intravenous and gavage administration. *Toxicol. Rep.* 6, 924–932. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.08.009>
- International Ski Federation, 2023. FIS to fully implement fluor wax ban at start of 2023-24 season [WWW Document]. URL <https://www.fis-ski.com/en/international-ski-federation/news-multimedia/news-2022/fis-to-fully-implement-fluor-wax-ban-at-start-of-2023-24-season> (accessed 8.2.23).
- ITRC, 2022. Naming Conventions for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) [WWW Document]. URL https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2022/09/NamingConventions_PFAS_Fact-Sheet_083122_508.pdf (accessed 8.8.23).
- Kannan, K., Corsolini, S., Falandysz, J., Fillmann, G., Kumar, K.S., Loganathan, B.G., Mohd, M.A., Olivero, J., Wouwe, N.V., Yang, J.H., Aldous, K.M., 2004. Perfluorooctanesulfonate and

- Related Fluorochemicals in Human Blood from Several Countries. *Environ. Sci. Technol.* 38, 4489–4495. <https://doi.org/10.1021/es0493446>
- Kelly, S., 2016. TEFLON'S TOXIC LEGACY. *Earth Isl. J.* 30, 18–26.
- Kim, O.-J., Kim, Seyoung, Park, E.Y., Oh, J.K., Jung, S.K., Park, S., Hong, S., Jeon, H.L., Kim, H.-J., Park, Bohyun, Park, Bomi, Kim, Suejin, Kim, B., 2023. Exposure to serum perfluoroalkyl substances and biomarkers of liver function: The Korean national environmental health survey 2015–2017. *Chemosphere* 322, 138208. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138208>
- Kim, S.-K., Kannan, K., 2007. Perfluorinated Acids in Air, Rain, Snow, Surface Runoff, and Lakes: Relative Importance of Pathways to Contamination of Urban Lakes. *Environ. Sci. Technol.* 41, 8328–8334. <https://doi.org/10.1021/es072107t>
- Kotthoff, M., Müller, J., Jüriling, H., Schlummer, M., Fiedler, D., 2015. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in consumer products. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 14546–14559. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4202-7>
- Lau, C., Anitole, K., Hodes, C., Lai, D., Pfahles-Hutchens, A., Seed, J., 2007. Perfluoroalkyl Acids: A Review of Monitoring and Toxicological Findings. *Toxicol. Sci.* 99, 366–394. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfm128>
- Lee, N., Baek, K., Park, S., Hwang, I., Chung, I., Choi, W., Jung, H., Lee, M., Yang, S., 2018. Pneumoconiosis in a polytetrafluoroethylene (PTFE) spray worker: a case report with an occupational hygiene study. *Ann. Occup. Environ. Med.* 30, 37. <https://doi.org/10.1186/s40557-018-0248-6>
- Liao, Q., Tang, P., Fan, H., Song, Y., Liang, J., Huang, H., Pan, D., Mo, M., LeiLei, Lin, M., Chen, J., Wei, H., Long, J., Shao, Y., Zeng, X., Liu, S., Huang, D., Qiu, X., 2023. Association between maternal exposure to per- and polyfluoroalkyl substances and serum markers of liver function during pregnancy in China: A mixture-based approach. *Environ. Pollut.* 323, 121348. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121348>

- Liesivuori, J., Kiviranta, H., Laitinen, J., Hesso, A., Hämeilä, M., Tornaesus, J., Pfäffli, P., Savolainen, H., 1994. AIRBORNE AEROSOLS IN APPLICATION OF POLYFLUORO POLYMER-BASED SKI WAXES. *Ann. Occup. Hyg.* 38, 931–937. <https://doi.org/10.1093/annhyg/38.6.931>
- Liu, C., Deng, J., Yu, L., Ramesh, M., Zhou, B., 2010. Endocrine disruption and reproductive impairment in zebrafish by exposure to 8:2 fluorotelomer alcohol. *Aquat. Toxicol.* 96, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2009.09.012>
- Liu, C., Yu, L., Deng, J., Lam, P.K.S., Wu, R.S.S., Zhou, B., 2009. Waterborne exposure to fluorotelomer alcohol 6:2 FTOH alters plasma sex hormone and gene transcription in the hypothalamic–pituitary–gonadal (HPG) axis of zebrafish. *Aquat. Toxicol.* 93, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2009.04.005>
- Lopez-Espinosa, M.-J., Mondal, D., Armstrong, B.G., Eskenazi, B., Fletcher, T., 2016. Perfluoroalkyl Substances, Sex Hormones, and Insulin-like Growth Factor-1 at 6–9 Years of Age: A Cross-Sectional Analysis within the C8 Health Project. *Environ. Health Perspect.* 124, 1269–1275. <https://doi.org/10.1289/ehp.1509869>
- Lutz, J., Gebhard, A., Zipp, F., Schuster, J., 2023. Investigation of the impact of the fluorine-content of ski wax on the friction between ice and ski base using a novel tribometer. *Tribol. Int.* 187, 108705. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108705>
- Maplus, n.d. FP4 SUPERMED Powder [WWW Document]. Maplus. URL <https://brikomaplus.de/en/skiwachs/race-fp4/fp4-supermed-powder.html> (accessed 6.24.23).
- Martin, J.W., Mabury, S.A., O'Brien, P.J., 2005. Metabolic products and pathways of fluorotelomer alcohols in isolated rat hepatocytes. *Chem. Biol. Interact.* 155, 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2005.06.007>
- Masia, S., 2010. Grip and Glide. *Ski. Herit.* 2010, 42–45.
- Massarsky, A., Parker, J., Donnell, M., Fung, E., Unice, K., 2021. Critical evaluation of ToxCast-Reactome predicted toxicity pathway correspondence of the human liver HepG2 activity

- profile with observed PFOA and PFOS hazards. *Comput. Toxicol.* 21, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.comtox.2021.100212>
- Monroy, R., Morrison, K., Teo, K., Atkinson, S., Kubwabo, C., Stewart, B., Foster, W.G., 2008. Serum levels of perfluoroalkyl compounds in human maternal and umbilical cord blood samples. *Environ. Res.* 108, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.06.001>
- Nabb, D.L., Szostek, B., Himmelstein, M.W., Mawn, M.P., Gargas, M.L., Sweeney, L.M., Stadler, J.C., Buck, R.C., Fasano, W.J., 2007. In Vitro Metabolism of 8-2 Fluorotelomer Alcohol: Interspecies Comparisons and Metabolic Pathway Refinement. *Toxicol. Sci.* 100, 333–344. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfm230>
- Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1021, 2023. , Úřední věstník EU řady L.
- Nařízení Komise (EU) 2021/1297, 2021. , Úřední věstník EU řady L.
- Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2020/784, 2020. , Úřední věstník EU řady L.
- Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2023/1608, 2023. , Úřední věstník EU řady L.
- Nicol, L., Keyte, I., Kreissing, J., Whiting, R., Matulina, A., Calasso, M.P., 2021. PFAS in the treatment of skis — Use, Emissions and Alternatives (No. M–2032). Miljødirektoratet / Norwegian Environment Agency.
- Nieboer, E., Thomassen, Y., Chashchin, V., Odland, J.Ø., 2005. Occupational exposure assessment of metals. *J. Environ. Monit.* 7, 411–415. <https://doi.org/10.1039/B504183J>
- Nilsson, H., 2012. Occupational exposure to fluorinated ski wax. Örebro University, School of Science and Technology.
- Nilsson, H., Kärrman, A., Rotander, A., Bavel, B. van, Lindström, G., Westberg, H., 2013a. Professional ski waxers' exposure to PFAS and aerosol concentrations in gas phase and different particle size fractions. *Environ. Sci. Process. Impacts* 15, 814–822. <https://doi.org/10.1039/C3EM30739E>

- Nilsson, H., Kärrman, A., Rotander, A., van Bavel, B., Lindström, G., Westberg, H., 2013b. Biotransformation of fluorotelomer compound to perfluorocarboxylates in humans. *Environ. Int.* 51, 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.09.001>
- Nilsson, H., Kärrman, A., Westberg, H., Rotander, A., van Bavel, B., Lindström, G., 2010. A Time Trend Study of Significantly Elevated Perfluorocarboxylate Levels in Humans after Using Fluorinated Ski Wax. *Environ. Sci. Technol.* 44, 2150–2155. <https://doi.org/10.1021/es9034733>
- Olsen, G.W., Burris, J.M., Ehresman, D.J., Froehlich, J.W., Seacat, A.M., Butenhoff, J.L., Zobel, L.R., 2007. Half-Life of Serum Elimination of Perfluorooctanesulfonate, Perfluorohexanesulfonate, and Perfluorooctanoate in Retired Fluorochemical Production Workers. *Environ. Health Perspect.* 115, 1298–1305. <https://doi.org/10.1289/ehp.10009>
- Olsen, G.W., Zobel, L.R., 2007. Assessment of lipid, hepatic, and thyroid parameters with serum perfluorooctanoate (PFOA) concentrations in fluorochemical production workers. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 81, 231–246. <https://doi.org/10.1007/s00420-007-0213-0>
- Plassmann, M.M., Berger, U., 2013. Perfluoroalkyl carboxylic acids with up to 22 carbon atoms in snow and soil samples from a ski area. *Chemosphere* 91, 832–837. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.066>
- Plassmann, M.M., Berger, U., 2010. Trace Analytical Methods for Semifluorinated n-Alkanes in Snow, Soil, and Air. *Anal. Chem.* 82, 4551–4557. <https://doi.org/10.1021/ac1005519>
- Rex, n.d. Rex Racing Service Line [WWW Document]. Rex. URL <https://rex.fi/en/racing-service-line> (accessed 6.24.23a).
- Rex, n.d. Fluor Free Glide Waxes [WWW Document]. URL <https://rex.fi/en/fluor-free-glide-waxes> (accessed 8.2.23b).
- Rogowski, I., Gauvrit, J.-Y., Léonard, D., Lanteri, P., 2005. Typology of the gliding waxes in cross-country skiing: Comparison between classifications based on the chemical composition

- and those based on the physical and physicochemical properties. *Cold Reg. Sci. Technol.* 43, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2005.03.002>
- Rogowski, I., Leonard, D., Gauvrit, J.-Y., Lanteri, P., 2007. Influence of fluorine-based additive content on the physical and physicochemical properties of ski gliding wax. *Cold Reg. Sci. Technol.* 49, 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.03.010>
- Semerád, J., Horká, P., Filipová, A., Kukla, J., Holubová, K., Musilová, Z., Jandová, K., Frouz, J., Cajthaml, T., 2022. The driving factors of per- and polyfluorinated alkyl substance (PFAS) accumulation in selected fish species: The influence of position in river continuum, fish feed composition, and pollutant properties. *Sci. TOTAL Environ.* 816, 151662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151662>
- Shoeib, M., Harner, T., M. Webster, G., Lee, S.C., 2011. Indoor Sources of Poly- and Perfluorinated Compounds (PFCS) in Vancouver, Canada: Implications for Human Exposure. *Environ. Sci. Technol.* 45, 7999–8005. <https://doi.org/10.1021/es103562v>
- Skigo, n.d. HF GLIDER UNIVERSAL [WWW Document]. Skigo. URL <https://shopen.skigo.se/en/gliders/high-fluor-hf/hf-glider-universal/> (accessed 6.24.23a).
- Skigo, n.d. FLUOR POWDER C22 [WWW Document]. Skigo. URL <https://shopen.skigo.se/en/gliders/powder/fluor-powder-c22-pulver/> (accessed 6.24.23b).
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/122/ES, 2006. , Úřední věstník EU řady L.
- Smith, S.J., Lewis, J., Wiberg, K., Wall, E., Ahrens, L., 2023. Foam fractionation for removal of per- and polyfluoroalkyl substances: Towards closing the mass balance. *Sci. Total Environ.* 871, 162050. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162050>
- Steenland, K., Fletcher, T., Stein, C.R., Bartell, S.M., Darrow, L., Lopez-Espinosa, M.-J., Barry Ryan, P., Savitz, D.A., 2020. Review: Evolution of evidence on PFOA and health following the assessments of the C8 Science Panel. *Environ. Int.* 145, 106125. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106125>

- Stockholm Convention, n.d. Overview [WWW Document]. Stockh. Conv. URL <https://www.pops.int/Implementation/IndustrialPOPs/PFAS/Overview/tabid/5221/Default.aspx> (accessed 6.28.23).
- Strøm, E., Alexandersen, O., 1990. Lungeskade i forbindelse med smøring av ski. *Tidsskr Laegeforen* 3614–3616.
- Švermová, P., Černík, M., 2020. Corporate Social Responsibility of Companies Producing PFOA Containing Waxes for Cross-Country Skiing. *Sustainability* 12, 5141. <https://doi.org/10.3390/su12125141>
- Swix, n.d. Fluoro-free ski wax from Swix [WWW Document]. Swix. URL <https://www.swixsport.com/en/about-swix/sustainability/health-environment/> (accessed 6.24.23).
- Talasniemi, P., Björkqvist, S., Ashja, M., Rosen, A., Iversen, C., Bæringsdóttir, B.B., 2022. Nordic enforcement project on PFOS and PFOA in chemical products and articles.
- Toko, 2022. FAQ about fluorine free [WWW Document]. Toko. URL <https://www.toko.ch/en/news-wax-tip/news-wax-tip/news/show/faq-about-fluorine-free/> (accessed 6.24.23).
- Toms, L.-M.L., Calafat, A.M., Kato, K., Thompson, J., Harden, F., Hobson, P., Sjödin, A., Mueller, J.F., 2009. Polyfluoroalkyl Chemicals in Pooled Blood Serum from Infants, Children, and Adults in Australia. *Environ. Sci. Technol.* 43, 4194–4199. <https://doi.org/10.1021/es900272u>
- Traverso, E., Rinaldi, A., 1993. Ski lubricant comprising paraffinic wax and a hydrocarbon compound containing a perfluoro segment. US5202041A.
- Tsai, W.-T., 2009. Environmental hazards and health risk of common liquid perfluoro-n-alkanes, potent greenhouse gases. *Environ. Int.* 35, 418–424. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.08.009>
- Vauhti, n.d. Fluor Free Products [WWW Document]. Vauhti. URL <https://vauhti.fi/en/ski-waxing/fluor-free-products/> (accessed 8.2.23).

- Vested, A., Ramlau, -Hansen Cecilia Høst, Olsen, S.F., Bonde, J.P., Kristensen, S.L., Halldorsson, T.I., Becher, G., Haug, L.S., Ernst, E.H., Toft, G., 2013. Associations of in Utero Exposure to Perfluorinated Alkyl Acids with Human Semen Quality and Reproductive Hormones in Adult Men. *Environ. Health Perspect.* 121, 453–458. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205118>
- Yamazaki, E., Taniyasu, S., Wang, X., Yamashita, N., 2021. Per- and polyfluoroalkyl substances in surface water, gas and particle in open ocean and coastal environment. *Chemosphere* 272, 129869. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129869>
- Yao, Y., Chang, S., Sun, H., Gan, Z., Hu, H., Zhao, Y., Zhang, Y., 2016. Neutral and ionic per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in atmospheric and dry deposition samples over a source region (Tianjin, China). *Environ. Pollut.* 212, 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.023>
- Yu, X., Takabe, Y., Yamamoto, K., Matsumura, C., Nishimura, F., 2016. Biodegradation Property of 8:2 Fluorotelomer Alcohol (8:2 FTOH) under Aerobic/Anoxic/Anaerobic Conditions. *J. Water Environ. Technol.* 14, 177–190. <https://doi.org/10.2965/jwet.15-056>
- Zhang, S., Szostek, B., McCausland, P.K., Wolstenholme, B.W., Lu, X., Wang, N., Buck, R.C., 2013. 6:2 and 8:2 Fluorotelomer Alcohol Anaerobic Biotransformation in Digester Sludge from a WWTP under Methanogenic Conditions. *Environ. Sci. Technol.* 47, 4227–4235. <https://doi.org/10.1021/es4000824>
- Zhang, W., Pang, S., Lin, Z., Mishra, S., Bhatt, P., Chen, S., 2021. Biotransformation of perfluoroalkyl acid precursors from various environmental systems: advances and perspectives. *Environ. Pollut.* 272, 115908. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115908>