

Com'è lo stato di salute dei nostri boschi?

34 anni di monitoraggio permanente del bosco

Programma intercantonale di monitoraggio permanente dei boschi nei Cantoni di AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH e degli uffici per l'ambiente della Svizzera Centrale con la partecipazione dell'UFAM. | Risultati dal 2013 al 2017 | Rapporto 5



UMWELTFACHSTELLEN

Rapporto in tedesco, con introduzione italiana



INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PFLANZENBIOLOGIE SCHÖNENBUCH

Impressum

Eine Information der kantonalen Forstämter Aargau, Bern, Basellandschaft, Basel-Stadt, Graubünden, Solothurn, Thurgau, Zug und Zürich und der Umweltfachstellen der Zentralschweiz mit Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

Auftraggeber

Kanton AG: Marcel Murri, Alain Morier | Kanton BE: Adrian Meier, Walter Beer, Roger Schmidt | Kantone BS/BL: Ueli Meier | Kanton GR: Dr. Ueli Bühler, Marco Vanoni, Reto Hefti | Kanton SO: Jürg Froelicher | Kanton TG: Gerold Schwager, Daniel Böhi | Kanton ZG: Dr. Martin Winkler | Kanton ZH: Erich Good, Dr. Konrad Nötzli | Umweltfachstellen der Zentralschweiz: Dr. Gérald Richner, David Widmer | BAFU Abteilung Wald: Dr. Sabine Augustin | BAFU Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien: Dr. Reto Meier

Auftragnehmer

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie

Autoren

Sabine Braun, Sven Hopf, Lucienne de Witte, unter Mitwirkung von: Delphine Antoni, Dieter Bader, Sabine Bulliard, Walter und Heidi Flückiger, Moïse Groelly, Caroline Stritt, Roland Woëffray

Disclaimer

Diese Studie wurde im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH, der Zentralschweizer Kantone und des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Herausgeber

Institut für
Angewandte Pflanzenbiologie (IAP)
Sandgrubenstrasse 25
CH-4124 Schönenbuch
Telefon +41 61 485 50 70
www.iap.ch

Französischer Titel

Notre forêt, comment se porte-t-elle?

Italienischer Titel

Com'è lo stato di salute dei nostri boschi?

Englischer Titel

How is our forest?

Design | Herstellung

krause-graphics.com | Lörrach

© IAP Schönenbuch | Januar 2018

Wie geht es unserem Wald?

34 Jahre Walddauerbeobachtung

Interkantoniales Walddauerbeobachtungsprogramm im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH und der Zentralschweizer Kantone mit Beteiligung des BAFU | Bericht 2013-2017

Programme d'observation permanente intercantonal des forêts des cantons d'AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH, des offices de l'environnement de la Suisse centrale et de l'OFEV

Résultats de 2013 à 2017 | Rapport 5

Programma intercantonale di monitoraggio permanente dei boschi nei Cantoni di AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH e degli uffici per l'ambiente della Svizzera Centrale con la partecipazione dell'UFAM.

Risultati dal 2013 al 2017 | Rapporto 5

Intercantonal Permanent Forest Observation Program of the Cantons AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH, of the environmental offices of Central Switzerland and of the Federal Office for the Environment (FOEN)

Results from 2013 to 2017 | Report 5



Schönenbuch, Januar 2018

INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PFLANZENBIOLOGIE SCHÖNENBUCH

Inhaltsverzeichnis | Contenuto (p 6-15 italiano)

Riscontri più importanti raccolti in 34 anni di monitoraggio permanente del bosco	6	7 Stickstoffauswaschung und Bodenversauerung	58
Mutamenti climatici	8	7.1 Stickstoffauswaschung	60
Carico di azoto	10	7.1.1 Vergleich mit Grenzwerten	60
Acidificazione dei suoli	12	7.1.2 Entwicklung	61
Sostenibilità delle sostanze nutritive nella raccolta di alberi interi	13	7.1.3 Mittlere N-Auswaschung in Beziehung zu Standortfaktoren	61
Ozono	14	7.2 Bodenversauerung	63
1 Einleitung	16	7.2.1 Entwicklung in den Beobachtungsflächen mit Bodenlösungsmessungen	63
2 Bonitierung des Kronenzustands	17	7.2.2 Entwicklung in den Stickstoffversuchsflächen	66
2.1 Kronenverlichtung	17	7.3 Auswaschung von Phosphor + organischem Stickstoff	67
2.2 Baummortalität	19	7.4 Abschliessende Bemerkungen zu Bodenlösungsmessung	68
2.2.1 Mortalität von Buchen	19	7.5 Beziehung zwischen Vegetation und Basensättigung	69
2.2.2 Mortalität von Fichten	20	7.5.1 Beziehung zwischen Basensättigung + Zeigerarten	69
2.2.3 Mortalität von Eichen	22	7.5.2 Beziehung zwischen Basensättigung + Vegetationseinheit	70
2.2.4 Sturmschäden und Waldbrand	23	7.6 Regenwürmer und ihre Beziehung zur Bodenchemie und den Feuchteverhältnissen	71
2.2.5 Wirkung von Trockenheit und Ernährung auf die Mortalität	24		
2.3 Monitoring Eschentriebsterben	25	8 Mykorrhizierung von Buchen in einem Stickstoffgradienten	74
2.4 Phytopathologische Untersuchungen an Ahorn	27	8.1 Einleitung	74
3 Nährstoffversorgung	28	8.2 Vorgehen	74
3.1 Entwicklung	28	8.3 Ergebnisse	76
3.2 Nährstoffkonzentrationen und Stickstoffdeposition	30	8.4 Diskussion	79
3.3 Nährstoffkonzentrationen und Bodenlösung	32	9 Nährstoffbilanzen	81
3.4 Nährstoffkonzentrationen und Ozonbelastung	32	9.1 Nährstoffkonzentrationen in Rinde und Holz	81
3.5 Ernährungsversuche Alvanu, Davos, Klosters	33	9.2 Nährstoffentzug bei Ernte verschiedener Baumfraktionen	83
4 Triebwachstum und Fruchtbehang	34	9.3 Phosphor-Eintrag und Phosphor-Austrag	83
4.1 Triebwachstum	34	9.4 Berechnung der Durchwurzelungstiefe	84
4.2 Fruchtbehang bei Buchen	35	9.5 Berechnung von Nährstoffbilanzen	86
4.3 Verfärbungen	37	9.6 Verallgemeinerung der Nährstoffbilanzrechnungen	88
4.3.1 Interkostalchlorosen	37	9.6.1 Modellierung Oberhöhenbonität	88
4.3.2 Photobleaching	38	9.6.2 Modellierung der Nährstoffbilanzen	90
5 Stammzuwachs	40	9.7 Empfehlungen für gefährdete Standorte	92
5.1 Entwicklung und Artenvergleich	40	9.7.1 Förderung des Jungwuchses	93
5.2 Welche Faktoren erklären den Stammzuwachs?	41	9.7.2 Ernteverfahren	93
5.2.1 Stammzuwachs der Buchen von 1984-2014	42	9.7.3 Baumartenwahl und biologische Aktivität des Bodens	93
5.2.2 Stammzuwachs der Fichten von 1992 bis 2014	46	9.7.4 Humusbewirtschaftung	95
5.2.3 Diskussion des Stammzuwachses 1984-2014	49	9.8 Nährstoffrecycling mit der Laubstreu	95
5.3 Dendrochronologische Untersuchungen	50	10 Trockenheit	96
6 Auswirkung erhöhter Stickstoffeinträge	52	10.1 Wasserfluss im Stamm	98
6.1 Stickstoffeinträge in der Schweiz	52	10.2 Tiefe der Wasseraufnahme	99
6.2 Stickstoffeinträge in Walddauerbeobachtungsflächen	54		
6.2.1 Freilandniederschlag und Kronentraufe	54		
6.2.2 Eintrag von Ammoniakstickstoff	55		
6.2.3 Vergleich Kronentraufe – Einzelkomponenten	55		
6.3 Auswirkungen auf den Wald	56		
6.3.1 Nadeljahrgänge bei Fichten	57		

10.3	Trockenheitsindikatoren	100
10.3.1	Verwendete Trockenheitsindikatoren	101
10.3.2	Vergleich der Indikatoren	104
10.3.3	Gleichungen für die Bewertung des Trockenstresses in Klimaszenarien	106
10.3.4	Projektion in die Zukunft	107
10.4	Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope in Jahrringen	108
10.4.1	Probenumfang und Berechnungen	108
10.4.2	Ergebnisse der Isotopenanalysen	110
10.5	Sauerstoffisotope in Xylemwasser	112
11	Ozon	113
11.1	Entwicklung und Wirkung auf Pflanzen	113
11.2	Ozonschäden an den Gipfeltrieben	114
11.3	Länge der Vegetationsperiode zur Evaluation der Ozonbelastung	115
12	Bodenverdichtung	116
12.1	Regenwürmer	116
12.2	Regeneration der Wasserleitfähigkeit	117
13	Literatur	118
14	Anhang	128
14.1	Statistische Auswertung und Tabellen	128
14.1.2	Polynomially distributed lag model zur Berechnung der Tiefe der Nährstoffaufnahme	136
14.1.3	Polynomially distributed lag model für die Beziehung mit Klimaparametern im Jahresverlauf	136
14.2	Glossar	138

Riscontri più importanti raccolti in 34 anni di monitoraggio permanente del bosco

Punti essenziali:

- L'assimilazione di fosforo per quanto riguarda faggi e abeti rossi è calata rispettivamente del 25% e del 15% e oggi il livello riflette una carenza acuta.
- Dal 1987 la crescita dei tronchi dei faggi è diminuita del 31%, mentre tra gli abeti rossi non è possibile individuare uno sviluppo chiaro.
- Apporti di azoto superiori a 25 kg per ettaro e anno inibiscono la crescita di faggi e abeti rossi.
- Elevati apporti di azoto rafforzano gli effetti della siccità sulla crescita dei tronchi dei faggi e sulla mortalità degli abeti rossi.
- Interazioni tra azoto e siccità nonché inverni miti rappresentano un fattore importante per spiegare la diminuzione della crescita dei faggi.
- Elevati apporti di azoto riducono la micorrizzazione delle radici dei faggi e la diversità delle specie. Il fattore che influenza maggiormente la composizione delle specie delle micorrize è la saturazione basica.
- Dal 2000 la fruttificazione dei faggi è aumentata sensibilmente.
- Nel periodo oggetto di osservazione l'acidificazione dei suoli è progredita.
- Su suoli acidi il rischio di schianti da vento è nettamente superiore.
- Nonostante il deperimento del frassino si sia diffuso in Svizzera dal 2008, ci sono ancora frassini indenni.
- Diversamente da faggi e abeti rossi, il diradamento delle chiome delle querce non reagisce alla siccità.
- La raccolta di alberi interi non è sostenibile sotto il profilo dei bilanci delle sostanze nutritive, soprattutto non con gli attuali apporti di azoto.



Foto 1: danni dovuti alla siccità nella zona di La Sarraz (VD), scattata il 29.07.2015.

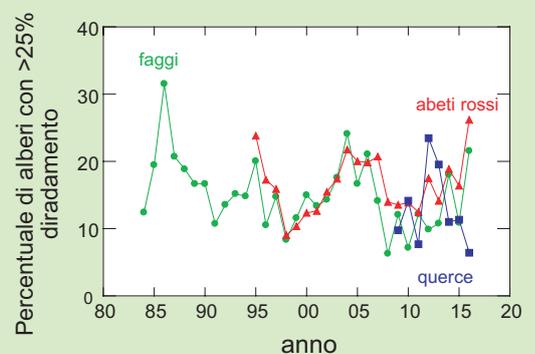
Il monitoraggio permanente del bosco costituisce uno strumento prezioso per individuare e documentare cambiamenti a insorgenza lenta nei boschi. Mentre negli anni 1980, ossia all'inizio del programma di monitoraggio permanente del bosco, l'attenzione era concentrata sulle conseguenze delle piogge acide e

dell'ozono, successivamente si è spostata sugli effetti che gli elevati apporti di azoto hanno sui boschi. Gli sviluppi più recenti nei boschi svizzeri indicano che i cambiamenti climatici sono divenuti un fattore importante per la salute del bosco. Pertanto gli sviluppi che abbiamo osservato sono l'esito di variegati fattori di carico antropici che continuano a essere analizzati con la massima attenzione. Tra questi rientrano un carico elevato di azoto, l'acidificazione del suolo e gli elevati livelli di ozono nei mesi estivi. Gli esiti e la nostra sintesi di 34 anni di monitoraggio permanente del bosco vengono presentati nei paragrafi seguenti.

Durante le osservazioni effettuate nei boschi svizzeri nel corso degli ultimi quattro anni, l'attenzione è stata posta sui cambiamenti climatici in corso. Tra questi rientrano

il lungo periodo di siccità nell'estate del 2015, durante la quale in diverse aree del Paese le chiome degli alberi hanno assunto un colore marrone, come ad esempio nei boschi di querce pubescenti nel Vallese e a La Sarraz VD (foto 1). Insieme a gelate tardive, inverni miti, fruttificazione e ozono, la siccità ha un ruolo importante per quanto concerne il diradamento delle chiome di faggi e

III. 1: quota di faggi, abeti rossi e querce con diradamento delle chiome >25%.



abeti rossi, mentre tra le querce non è riscontrabile alcun effetto legato alla siccità. Ciò risulta con chiarezza anche nel processo legato al diradamento delle chiome che per faggi e abeti rossi avviene piuttosto contemporaneamente,



Foto 2: faggio con fruttificazione straordinariamente forte.

mentre tra le querce è in controtendenza rispetto alle altre due specie (ill. 1). Anche il forte ingiallimento riscontrato nel corso dell'ultima raccolta di cacciate apicali nell'agosto del 2015 probabilmente è legata al caldo e alla siccità.

Da alcuni anni tra i faggi è più elevata la frequenza di **anni di pasciona** e viene creata una quantità più elevata di frutti (cap. 4.2). La letteratura in materia forestale parla di un anno di pasciona se vengono contati più di 150 frutti per m² di superficie. L'anno di pasciona più estremo osservato finora è stato il 2011 con circa 430 frutti per m². Nel 2014 sono stati contati all'incirca 360 frutti per m². Anche il 2016 è stato un anno di pasciona forte. Durante la valutazione i faggi spesso erano marroni piuttosto

che verdi e le foglie erano particolarmente piccole (foto 2). Solo in occasione della prossima raccolta di cacciate apicali nel 2019 sarà possibile valutare se si tratta di un nuovo record. Questa evoluzione influisce negativamente sulla crescita degli alberi, dato che la fruttificazione elevata consuma molte risorse importanti per l'albero.

Morie di abeti rossi spesso sono dovute a infestazioni da **bostrico**. Quest'ultimo assale prevalentemente alberi indeboliti, ad es. durante periodi prolungati di siccità. Durante le calde estati del 2015 e del 2016 ha potuto contare su condi-



Foto 3: infestazione da bostrico nello Scheidwald (BE).

zioni ottime e nel 2017 l'infestazione ha raggiunto il secondo livello più elevato mai registrato dall'inizio dell'attività di monitoraggio. Tuttavia dalle analisi dei dati risulta anche che gli effetti della siccità vengono rafforzati sensibilmente da elevati carichi di azoto o da carenze di sostanze nutritive (potassio, magnesio) (cap. 2.2.2.). Ciò significa che la combinazione tra stress da clima e carico



Foto 4: frassino danneggiato

ambientale indebolisce ulteriormente gli abeti rossi. Per i faggi viene registrata una mortalità superiore in caso di siccità o carenza di fosforo (cap. 2.2.1.).

Il **deperimento delle gemme dei frassini** è una malattia importata dall'Asia riscontrata per la prima volta negli anni '90 in Polonia e diffusasi rapidamente in tutta Europa (1). Nel 2008 i sintomi di avvizzimento sono stati rilevati per la prima volta anche nella Svizzera nordoccidentale (2, foto 4) e da lì questa fitopatologia si è diffusa in tutto il Paese nel corso di 7 anni. Nel 2013 l'IAP ha avviato un progetto di monitoraggio al fine di scoprire qualcosa in più sul decorso della patologia e di trovare alberi resistenti. Dei 204 frassini sani scelti, nel 2017 ancora il 22% è stato valutato come esente da sintomi a livello visivo (cap. 2.3).

Escludendo gli anni estremi del 1990 e del 1999, dagli anni '90 i **danni da tempesta** nella media sono aumentati (cap. 2.2.4). Da precedenti analisi di dati è inoltre emerso che su suoli molto

acidi un numero sempre più elevato di alberi viene abbattuto insieme alla cepaia sradicata. Elevati apporti di azoto e la forte acidificazione dei suoli indebolisce l'apparato radicale e pertanto gli alberi vengono sradicati più rapidamente da tempeste, come avvenuto ad esempio nel 2017 a Giswil OW (foto 5).

Tra i faggi la **crescita dei tronchi** è sensibilmente diminuita dal 1987 (ill. 2, cap. 5.1.). Tra gli abeti rossi una diminuzione è stata osservata fino al 2006; da allora la crescita è di nuovo in aumento. Nella media di tutte le superfici su cui

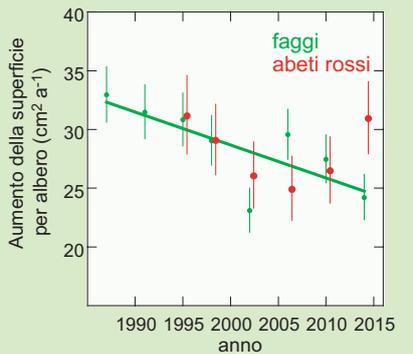
Foto 5: danni da tempesta a Giswil (OW).



querce e faggi convivono, le querce fanno registrare una crescita leggermente inferiore rispetto ai faggi.

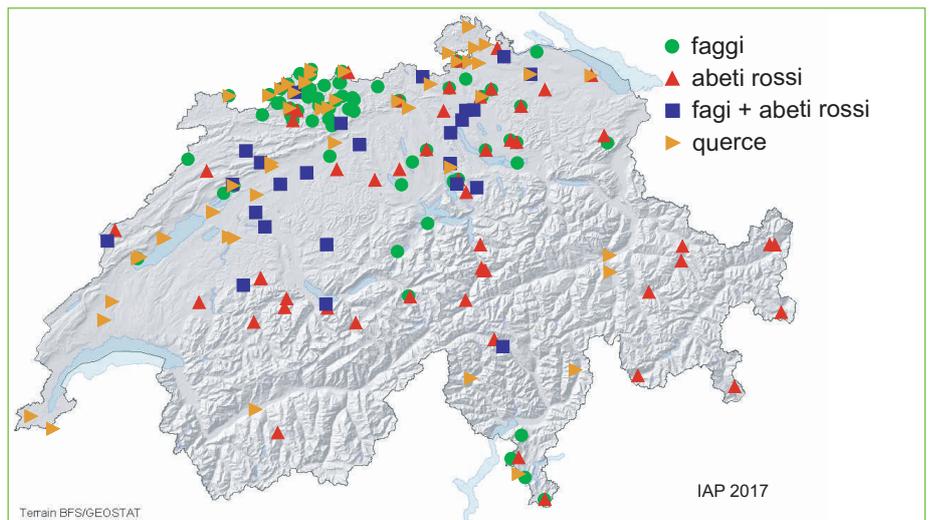
Mentre l'aumento dei danni dovuti a tempeste (cap. 2.2.4), della fruttificazione per il faggio (cap. 4.2) o delle decolorazioni delle chiome (cap. 4.3) quale conseguenza di periodi estremamente lunghi di siccità o di caldo riguardano fenomeni ben visibili, cambiamenti dello stato di salute degli alberi (cap. 2.1),

III. 2: sviluppo della crescita della superficie per ciascun albero per faggi e abeti rossi



dell'approvvigionamento di sostanze nutritive (cap. 3), della crescita del tronco (cap. 5.1) e dell'acidificazione del suolo (cap. 7.2) possono essere rilevati solo grazie a misurazioni standardizzate e ripetute. Il monitoraggio pluriennale permanente del bosco su un ampio collettivo di alberi (ill. 3) rappresenta pertanto uno strumento eccellente per individuare sviluppi importanti nel bosco sotto il profilo forestale e cambiamenti nell'ecosistema boschivo sotto il profilo del tempo e degli spazi.

III. 3: superfici di osservazione dell'IAP.



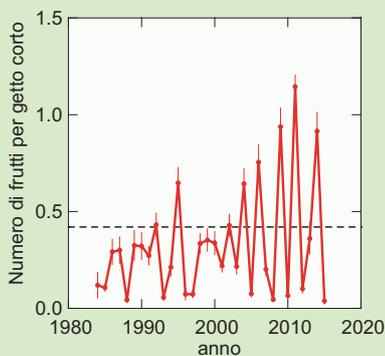
Mutamenti climatici

L'impatto degli esseri umani sul clima è stato ben documentato dal Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici («Intergovernmental Panel on Climate Change», 3). Dal 1864 in Svizzera le temperature sono aumentate già di 1,8°C (4). Per quanto riguarda la quantità delle precipitazioni non è individuabile una tendenza, però temperature elevate comportano un aumento dell'evaporazione e con ciò dello stress da siccità. Negli ultimi due decenni si sono verificate molto più di frequente annate con periodi prolungati di siccità e di caldo estremo. Le nostre superfici boschive soggette a un monitoraggio permanente si estendono su un ampio gradiente di temperatura e siccità e pertanto si prestano molto bene per l'analisi degli effetti climatici sui boschi naturali.

Secondo le nostre analisi, temperature più elevate da sole hanno effetti minori sugli alberi forestali, fatta eccezione per il fatto che inverni miti (temperature medie più elevate tra dicembre e marzo)

inibiscono la crescita dei tronchi degli abeti rossi ed elevati apporti di azoto rafforzano questo effetto. Inverni miti hanno effetti inibitori sulla crescita dei faggi solo se il carico di azoto è elevato o gli alberi soffrono di una carenza di magnesio (cap. 5.2). Una temperatu-

III. 4: andamento della fruttificazione per il faggio. Linea tratteggiata: limite pasciona (150 frutti/m²). Colonna=intervallo fiduciale al 95%



ra più alta (5) e un'elevata capacità di assorbire umidità da parte dell'aria (deficit di pressione di vapore saturo) hanno un ruolo decisivo anche per quanto riguarda la fruttificazione dei faggi (cap. 4.2). Come già rilevato in precedenza, nel corso del periodo di monitoraggio la fruttificazione è aumentata sensibilmente, sia nella frequenza degli anni di pasciona, sia nell'entità. Questo sviluppo è quindi probabilmente una conseguenza dei mutamenti climatici. Dato che un'elevata fruttificazione presenta una correlazione fortemente negativa con la crescita del tronco e positiva con il diradamento delle chiome, il faggio non può beneficiare di temperature più elevate, bensì subisce addirittura una riduzione della vitalità.

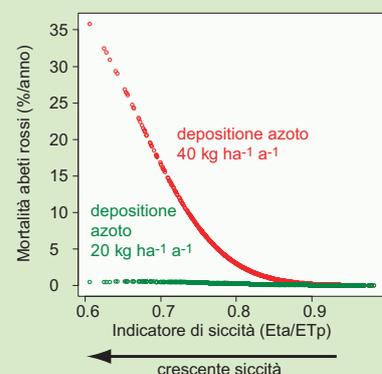
Sono gli effetti della siccità sulla cresci-

ta dei tronchi a risultare rilevanti per la prassi forestale. I processi che vi stanno alla base sono meno conosciuti (6). Dalle analisi ricavate dal monitoraggio permanente del bosco è emerso che l'effetto della siccità sulla crescita dei tronchi trova la sua spiegazione migliore nel bilancio idrico dell'ubicazione. Si tratta di una differenza sommata su un periodo vegetativo tra la somma delle precipitazioni e della capacità del terreno di immagazzinare acqua nonché dell'evaporazione potenziale (= evapotraspirazione). Per i faggi la sensibilità alla siccità per quanto riguarda la crescita dei tronchi con elevati apporti di azoto e un apporto di potassio non equilibrato è nettamente più elevata. Queste interazioni climatiche dell'apporto di azoto con la siccità e la temperatura invernale probabilmente sono importanti per spiegare il calo della crescita osservato tra i faggi.

Lo stress acuto da siccità comporta una depressione nei vasi che trasportano l'acqua. Con questa elevata tensione idrica si creano bolle d'aria nel sistema vascolare e il sistema di trasporto dell'acqua delle piante ne viene pregiudicato (embolia o cavitazione). Per quanto riguarda la tolleranza alla siccità di diverse specie di albero è decisivo se questo processo è rilevante già quando delle tensioni idriche si verificano in via naturale nella media pluriennale oppure se vi è un «margine di sicurezza» dai valori estremi (7, 8). Un albero muore se una determinata quota dei vasi ha perso la sua funzionalità (9). Chiudendo le stome, gli alberi di bosco possono contrastare lo stress da siccità fino a un certo punto. Dalle nostre analisi degli isotopi del carbonio e dell'ossigeno in sezioni trasversali (cap.

10.4) si può concludere che questo processo è più efficiente tra i faggi che tra gli abeti rossi. Un'ulteriore possibilità per evitare lo stress da siccità è l'assorbimento di acqua da strati del suolo più profondi. Anche questo processo può essere studiato analizzando gli isotopi di ossigeno e carbonio nell'acqua piovana, nel suolo, nei rami e nelle foglie (cap. 10.5). Dai risultati ottenuti in collaborazione con il Paul-Scherrer-Institut (PSI) risulta che gli abeti rossi assorbono l'acqua da una profondità minore rispetto ai faggi e alle querce. L'importanza degli strati del suolo inferiori è risultata con chiarezza anche in occasione di misurazioni di flussi idrologici nelle querce a Möhlin AG. Durante il periodo di siccità nell'estate 2015 la tensione idrica nel tronco è aumentata sensibilmente. Ciononostante, e sebbene le sonde per acqua nel suolo non rilevassero più acqua disponibile per le piante fino a una profondità di 60 cm, aveva ancora luogo un flusso d'acqua di entità ridotta. Se mancano strati del suolo inferiori, anche querce pubescenti sviluppano danni da siccità, come nell'esempio di La Sarraz VD (foto 1).

III. 5: interazione tra siccità e deposito di azoto sulla mortalità degli abeti rossi. Previsioni in base a un modello di regressione multivariato con media di tutti gli altri parametri.



Nel caso di alberi da bosco adulti alle nostre latitudini, l'insufficienza idraulica diretta dovuta ai vasi probabilmente non è però così importante per la mortalità come l'infestazione con parassiti di debolezza come bostrichi, chiodini o la necrosi della corteccia del faggio. Prima di deperire i faggi e le querce evidenziano una minore vitalità per diversi anni, il che fa presumere un'infestazione da parassiti. Per quanto riguarda la mortalità, la siccità è rilevante su diversi anni, anche per gli abeti rossi (cap. 2.2). Il migliore indicatore di siccità per la mortalità delle nostre specie di alberi è il rapporto tra evapotraspirazione attuale e potenziale (cap. 10.3). Tale rapporto può essere calcolato con l'ausilio di modelli idrologici e mostra il grado di limitazione dell'evaporazione in caso di siccità. Gli effetti della siccità sul tasso di mortalità degli abeti rossi (cap. 2.2) inoltre vengono rafforzati dagli apporti di azoto e dagli squilibri nelle sostanze nutritive (ill. 5).

Quale conseguenza dei mutamenti climatici il getto fogliare dei faggi avviene in anticipo (cap. 11.2). Anche la decolorazione delle foglie inizia leggermente prima, il che probabilmente è riconducibile agli effetti della siccità. In termini complessivi, tra il 1980 e il 2015 il periodo vegetativo si è allungato all'incirca di 10 giorni.

Carico di azoto

L'industria, il traffico e l'agricoltura emettono elevate quantità di composti azotati reattivi che con la pioggia (deposizione umida), quale aerosol o gas (deposizione secca) attraverso l'aria finiscono nuovamente nel suolo. Per via dell'elevata scabrosità del terreno, i boschi rappresentano un pozzo particolar-



III. 6: cartina degli apporti di azoto nel bosco per l'anno 2010 (UFAM/Meteotest).

mente efficace per questi composti. In Svizzera gli apporti possono raggiungere oltre 50 chilogrammi di azoto per ettaro e anno ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Gli ecosistemi boschivi sono sensibili agli apporti di azoto. Già negli anni 1980 si è compreso che apporti elevati di azoto possono comportare problemi negli ecosistemi boschivi (10, 11). Nella Convenzione sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero a lunga distanza UNECE (Convenzione LRTAP) sono stati elaborati i valori soglia per apporti di azoto (critical load) in ecosistemi diversi (12). Per boschi di latifoglie in zone temperate questi ammontano a $10\text{-}20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, per boschi di conifere a $5\text{-}15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Questi «critical load» vengono superati in oltre il 95% dei boschi svizzeri (13).

In seguito alle misure di protezione contro l'inquinamento atmosferico, negli ultimi anni l'apporto di azoto è leggermente diminuito. Nelle deposizioni sotto chioma (si tratta delle precipitazioni

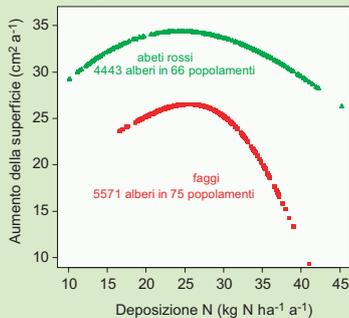
che raggiungono il suolo attraverso la chioma) ciò tuttavia non è misurabile ovunque. I carichi di azoto nelle deposizioni sotto chioma degli abeti rossi a Muri AG sono rimasti stabili, mentre a Brislach BL fino ad oggi sono aumentati. A Sagno TI, tra il 2003 e il 2006 i carichi di azoto sono diminuiti, mentre tra il 2006 e il 2015 hanno fatto registrare un lieve aumento. Nonostante il calo, il carico di azoto permane su livelli nettamente troppo elevati.

Foto 6: lo spargimento di liquame con una cisterna a pressione aumenta il carico di azoto.



L'azoto è una sostanza nutriente essenziale per le piante che spesso promuove la crescita. Dagli anni 1980 è stata rilevata una più intensa crescita del patrimonio boschivo (14) che è stata attribuita all'azoto. Un incremento della crescita tuttavia è possibile solo se sono disponibili in misura sufficiente anche le altre sostanze

III. 7: correlazione tra crescita del tronco di faggi e abeti rossi e il deposito di azoto. Per questo grafico sono stati ripresi valori medi per tutte le altre variabili eccetto il deposito di azoto (15).



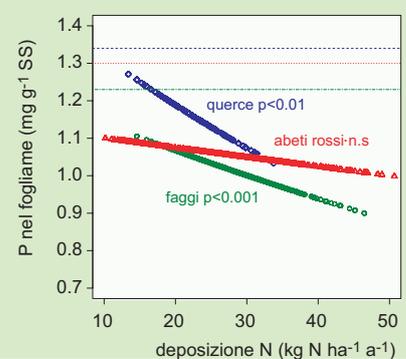
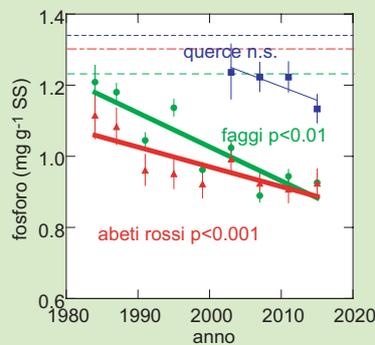
nutritive vitali per gli alberi, come fosforo, potassio e magnesio. Per tale motivo questa stimolazione della crescita è limitata e dipende dalle riserve di sostanze nutritive presenti nel suolo boschivo e dalla capacità di assorbire sostanze nutritive. Ciò si riflette nei nostri dati relativi al monitoraggio permanente del bosco: in caso di apporti inferiori a 25 kg N ha⁻¹ a⁻¹ viene rilevato un lieve aumento della crescita

Foto 7: misurazione della crescita del tronco



(ill. 7, cap. 5.1). In caso di apporti più elevati, il calo della crescita è stato lieve per gli abeti rossi e massiccio per i faggi (cap. 5.2). Per quanto concerne questo calo della crescita sono decisive variazioni delle concentrazioni delle sostanze nutritive negli alberi e interazioni tra l'apporto di azoto e fattori climatici (siccità, temperature invernali). Elevati apporti di azoto e relativi squilibri delle sostanze nutritive intensificano l'effetto inibitorio della siccità. Ne consegue che inverni miti inibiscono la crescita del tronco dei faggi (cap. 5.2). Probabilmente queste interazioni sono in gran parte responsabili del calo della crescita dei faggi osservato da noi negli ultimi 34 anni.

III. 8: sviluppo delle concentrazioni di fosforo nel fogliame di faggi, abeti rossi e querce (sinistra) e il rapporto tra concentrazioni di fosforo e l'apporto di azoto modellato (destra). Linee tratteggiate: valore soglia per nutrimento sufficiente secondo Göttlein (16).



Un ulteriore effetto dell'elevato carico di azoto è dato dallo squilibrio di sostanze nutritive nelle foglie e negli aghi degli alberi. Il calo della concentrazione di fosforo osservata nelle foglie di tutte le specie di alberi, per il faggio anche il calo di potassio e magnesio (cap. 3), probabilmente è una conseguenza dell'eccedenza di azoto. Per via delle variazioni, oggi le concentrazioni di fosforo in faggi e abeti rossi e le concentrazioni di magnesio nei faggi sono molto carenti. Il rapporto tra le concentrazioni

di azoto nel fogliame da un lato e di fosforo o potassio dall'altro aumentano con il crescente apporto di azoto. In particolare i rapporti misurati tra azoto e fosforo tra i faggi e gli abeti rossi sono nettamente più elevati rispetto ai valori soglia per un nutrimento armonico. In presenza di un elevato carico di azoto, i faggi inoltre hanno maggiori difficoltà a sfruttare le riserve di potassio e fosforo presenti nel suolo, il che indica un disturbo nell'assorbimento di sostanze nutritive. Il nutrimento delle querce è complessivamente migliore.

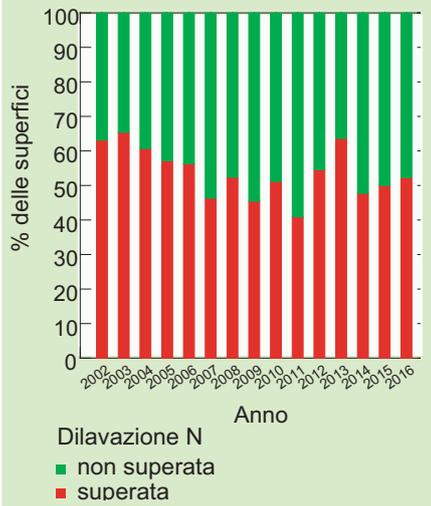
Lo squilibrio di sostanze nutritive tra gli alberi probabilmente è responsabile

anche per la minore resistenza rispetto a parassiti e siccità. Nel faggio questa interazione si manifesta con una maggiore mortalità in caso di siccità, quando contemporaneamente gli apporti di azoto sono elevati e la concentrazione di potassio o di magnesio negli aghi è squilibrata (cap. 2.2.2). Anche nel caso del faggio la mortalità aumenta in presenza di basse concentrazioni di fosforo nel fogliame (2.2.1).

L'azoto non assorbito dalle piante e dai

microorganismi viene dilavato dal suolo sotto forma di nitrato. Ciò è considerato un indizio di un carico eccessivo di azoto. A tale scopo l'UNECE ha definito dei valori soglia (17) per cui in Svizzera viene operata una distinzione a seconda dell'altitudine. Oggi tali valori soglia vengono superati all'incirca nella metà delle nostre superfici per cui sono dispo-

III. 9: frequenza del superamento dei valori soglia per la lisciviazione di nitrati.



nibili misurazioni delle soluzioni del suolo (ill. 9), nonostante un lieve calo della lisciviazione di nitrati dal 2005.

Nell'ecosistema boschivo il carico di azoto comporta anche dei cambiamenti nello strato erbaceo e nella composizione dei microorganismi del suolo. Specie vegetali che non sono nitrofile, ma spesso a rischio, diminuiscono, mentre specie nitrofile come ortiche o sambuco aumentano. Tra queste rientrano anche i rovi, il cui grado di copertura in presenza di apporti di azoto di $>20-25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aumenta in modo esponenziale (ill. 10). La diversità da noi analizzata delle micorrize sulle radici di faggi aumenta con un crescente

carico di azoto (cap. 10.4, 18). Il grado di micorizzazione delle radici fini, ossia la quota degli apici radicali occupati da funghi, è in calo (ill. 11). È interessante che anche specie importanti per l'assorbimento del fosforo divengano più rare in presenza di elevati apporti di azoto.



Foto 8: coperta di rovi (Frienisberg BE)

III. 10: grado di copertura di rovi in zone rade delle superfici di monitoraggio dei boschi in relazione alla deposizione di azoto modellato.

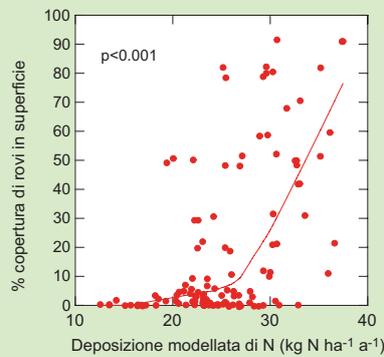


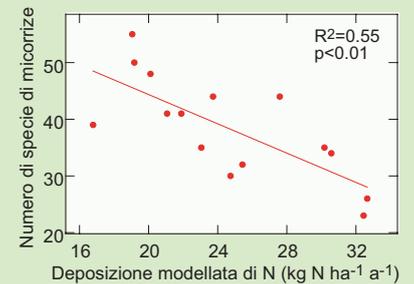
Foto 9: Alcune specie di micorrize (*Cenococcum geophilum* e *Laccaria amethystina*), sulle radici di faggi (Zugerberg Vordergeissboden (ZG)).



Acidificazione dei suoli

In seguito alle misure di protezione contro l'inquinamento atmosferico, l'apporto di composti solforosi, ossia le

III. 11: numero di specie di micorrize su radici di faggio in un gradiente della deposizione di azoto.



classiche «piogge acide», è sensibilmente diminuito. Tuttavia continua a essere elevato l'apporto di azoto, il quale ha anche un effetto acido. In un prima fase l'ammonio nel suolo viene trasformato in nitrato con emissione di ioni acidi. Il nitrato non assorbito dalle piante e dai microorganismi viene dilavato dal terreno e porta con sé ioni positivi. Tra questi rientrano i cosiddetti «cationi basici» calcio, potassio, magnesio e sodio, in presenza di valori pH bassi manganese e alluminio (ill. 12). Questo processo porta all'acidificazione dei suoli. In tale contesto diminuisce la saturazione basica, ossia la quota dei cationi basici nei scambiatori cationici del suolo. Al fine di vigilare sull'acidificazione risulta idonea una soluzione del suolo che viene estratta dal suolo con capsule ceramiche porose a installazione fissa. In caso di acidificazione, nella soluzione del suolo diminuisce il rapporto tra cationi basici e alluminio, ossia il cosiddetto rapporto BC/Al. Dalle nostre misurazioni è risultata una sensibile progressione dell'acidificazione (ill. 13), anche se in alcune ubicazioni è stato possibile osservare

un rallentamento dell'acidificazione dei suoli, probabilmente riconducibile a un calo dell'apporto di azoto.

Le possibili conseguenze per il bosco di un'acidificazione progressiva del suolo sono in gran parte invisibili, come ad

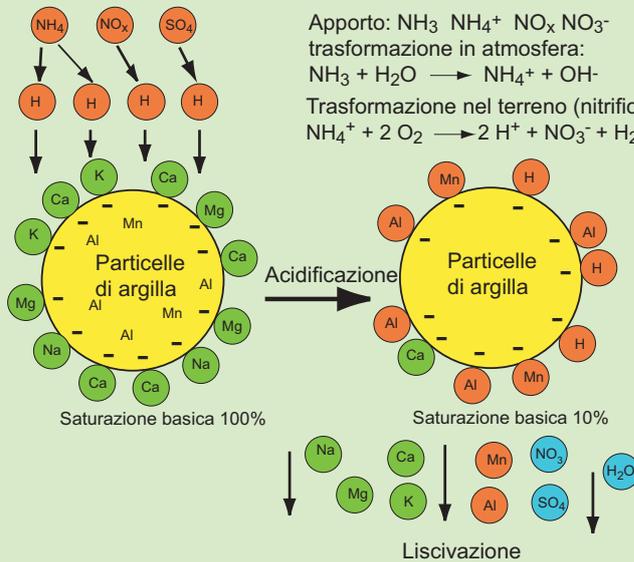
es. variazioni nella composizione della vegetazione o delle ectomicorrize, radicazione meno intensa o squilibri delle sostanze nutritive, come ad es. carenze di magnesio nel caso di faggi. Inoltre aumenta nettamente il rischio di schianti da vento (19).



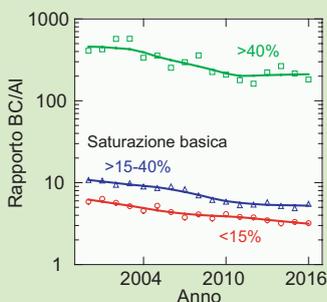
Foto 10: lavorazione di chiove di faggi in frammenti (Möhlin AG).

un terzo. A prescindere dal fatto che il valore energetico delle chiove è inferiore, la sottrazione di sostanze nutritive è varie volte superiore rispetto all'utilizzazione del tronco. Tale effetto è particolarmente marcato per quanto concerne il fosforo. Nei suoli boschivi il riapprovvigionamento in nutrienti avviene tramite la degradazione meteorica di minerali o l'apporto con la deposizione (polvere da campi o eruzioni di vulcani, polvere del Sahara ecc.). Queste fonti non sono in grado di coprire praticamente da nessuna parte la sottrazione di fosforo dovuta alla raccolta di alberi interi, mentre per potassio e calcio ciò avviene nella metà dei casi. Se viene tenuta in considerazione anche la lisciviazione delle sostanze

III. 12: rappresentazione schematica dell'acidificazione dei suoli e lisciviazione delle sostanze nutritive.



III. 13: evoluzione dell'indicatore di acidificazione rapporto BC/Al nella soluzione del suolo di superfici boschive in cui il suolo ha già subito diversi gradi di acidificazione. dati relativi allo strato attivo (0-30 cm). saturazione basica <15%: acidificazione molto elevata, >15-40%: acidificazione elevata, >40%: alcalino.

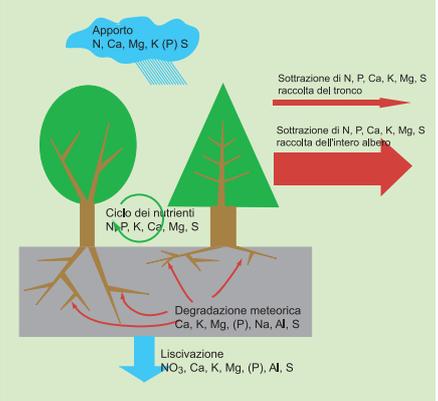


Lo stato attuale della saturazione basica del suolo può essere calcolato con l'ausilio di cartine relative alle unità vegetative e alla geologia (cap. 7.5). In tal modo è possibile procedere a una valutazione dei rischi per aree boschive. Per i Cantoni AG, BL, BS, FR, SO, TG e ZH sono state predisposte cartine di saturazione basica in scala 1:5'000.

Sostenibilità delle sostanze nutritive nella raccolta di alberi interi

La raccolta di alberi interi per lo sfruttamento del legno quale fonte energetica aumenta il raccolto di biomassa di circa

III. 14: ciclo dei nutrienti nel bosco con apporto e scarico



nutritive ai livelli odierni stimolata dagli apporti di azoto, anche i bilanci di calcio e magnesio divengono negativi nella maggior parte dei casi. In primo luogo ciò significa che l'odierno apporto di azoto rende impossibile un'economia forestale sostenibile nella maggior parte dei luoghi e che la raccolta di alberi interi non è sostenibile in nessun luogo se non viene effettuata una reintroduzione di sostanze nutritive (cap. 9).

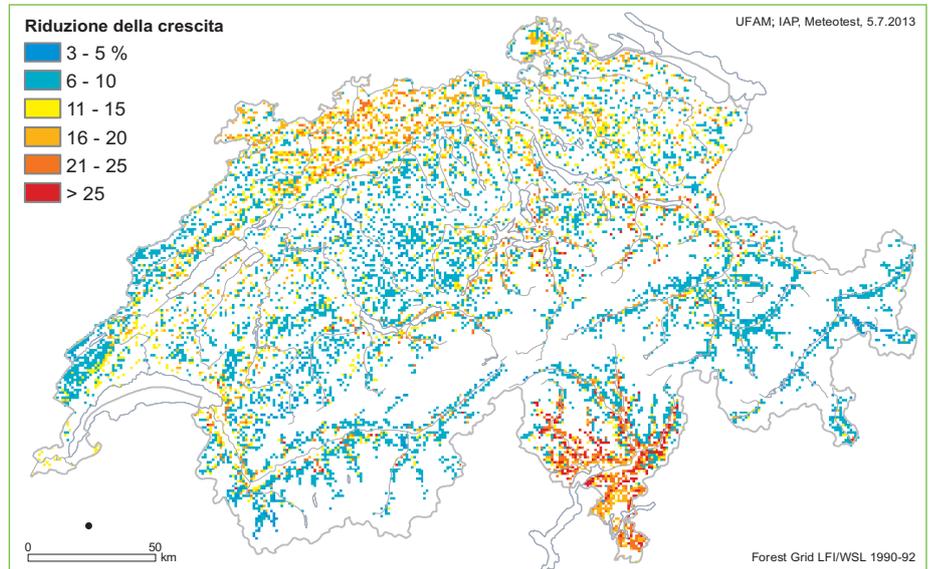
Ozono

L'ozono è un potente ossidante. I suoi effetti sulle piante sono molto ben stu-

Foto 11: decolorimento di color bronzo delle foglie dei faggi in seguito all'effetto dell'ozono (MuttENZ BL)

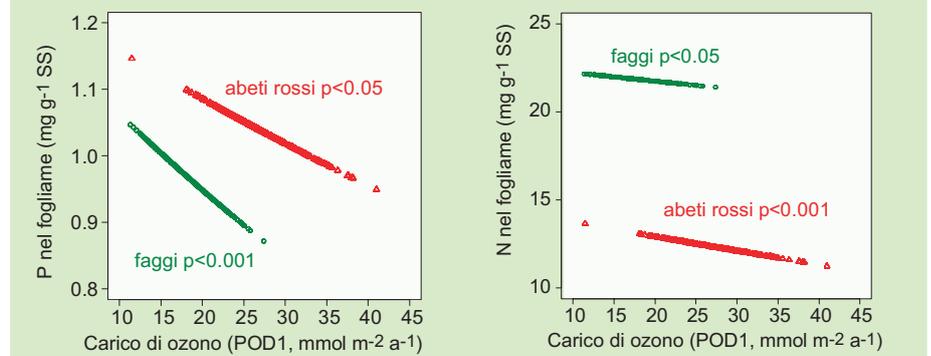


diati (20). Esso causa danni visibili e caratteristici sul fogliame (21, cfr. cap. 11.2). Tuttavia sotto il profilo forestale risulta più rilevante e più sensibile il calo della crescita dovuto all'ozono. Dopo aver analizzato diverse prove di fumigazione, in base alla Convenzione LRTAP un gruppo di lavoro ha stabilito valori soglia riferiti alla crescita (critical level) per diversi gruppi di specie di alberi (22). Attualmente per i faggi tale valore



III. 15: riduzione stimata della crescita dovuta all'ozono per alberi forestali (23).

III. 16: correlazione tra carico di ozono (valore medio 1991-2015) e la concentrazione di azoto (sinistra) e la concentrazione di fosforo (destra) nel fogliame del faggio.



ammonta a 5,2 e per abeti rossi a 9,2 mmol m⁻² a⁻¹ e viene superato in tutte le stazioni di misurazione e in tutti gli anni. Un tale effetto sulla crescita dovuto all'ozono è riscontrabile anche nelle analisi della crescita dei tronchi di alberi boschivi adulti. In base a una rappresentazione cartografica del carico di ozono per i boschi svizzeri è stata stimata una riduzione della crescita dell'11% nei boschi svizzeri (23).

Grazie alla riduzione delle emissioni di precursori dell'ozono, ossia di ossidi di azoto e di idrocarburi prodotti dal traffico e dall'industria, dagli anni 1980 i picchi di concentrazione di ozono sono leggermente calati. Il carico medio (mediana) si è però mantenuto su livelli stabili oppure è leggermente aumentato e il livello di base è cresciuto (24). Tuttavia, per gli alberi non è rilevante la concentrazione di ozono nell'aria, bensì l'assorbimento di ozono attraverso le

stome (carico di ozono). Dal 2000 il carico di ozono per abeti rossi è diminuito in quattro delle sei stazioni di misurazione gestite dall'IAP, mentre per i faggi in una su cinque.

Il diradamento delle chiome è più elevato in presenza di un carico di ozono elevato (cap. 2.1). L'ozono produce effetti anche sul nutrimento dell'albero dato che riduce le concentrazioni di azoto e di fosforo nel fogliame del faggio e negli aghi degli abeti rossi (cap. 3.4). In generale l'ozono inibisce il trasporto di carboidrati attraverso il floema nelle radici e in tal modo influisce negativamente sulla crescita delle radici e delle micorrizze (cfr. anche cap. 10.4).

letteratura

1. Kowalski, T. und Holdenrieder, O. (2008). Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 3, 45-50.
2. Engesser, R. et al. (2009). Wald und Holz 90, 24-27.
3. IPCC (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of the Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
4. Remund, J. et al. (2016). In: Wald im Klimawandel, eds. Pluess, A. R., Augustin, S. and Brang, P., pp. 23-37. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
5. Drobyshev, I. et al. (2010). Forest Ecology and Management 259, 2160-2171.
6. Arend, M. et al. (2016). In: Wald im Klimawandel, eds. Pluess, A. R., Augustin, S. and Brang, P., pp. 77-91. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
7. Choat, B. et al. (2012). Nature 491, 752-755.
8. Engelbrecht, B. M. J. (2012). Nature 491, 675-677.
9. Brodribb, T. J. und Cochard, H. (2009). Plant Physiology 149, 575-584.
10. Nihlgård, B. (1985). Ambio 14, 1-8.
11. Aber, J. D. et al. (1989). BioScience 39, 378-386.
12. Bobbink, R. und Hettelingh, J.-P. (2011). RIVM report 680359002, Coordination Centre for Effects, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
13. Rihm, B. und Achermann, B. (2016). Critical Loads of nitrogen and their exceedances, 78 pp., Berne, Federal Office for the Environment (FOEN).
14. Spiecker, H. et al. (1996). Growth Trends in European Forests. Springer-Verlag, New York, 372 pp.
15. Braun, S., Schindler, C. und Rihm, B. (2017). Science of the Total Environment 599-600, 637-646.
16. Göttlein, A., Baier, R. und Mellert, K. H. (2011). Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 182, 173-186.
17. CLRTAP (2016). Mapping Critical Loads for Ecosystems. Chapter V of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. Update 13/01/2017. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution,
18. de Witte, L. C. et al. (2017). Science of the Total Environment 605-606, 1083-1096.
19. Braun, S. et al. (2003). Water Air and Soil Pollution 142, 327-340.
20. UNECE (2017). Mapping Critical Levels for Vegetation, 66 pp., Bangor, UK, Center for Ecology & Hydrology (CEH).
21. Skelly, J. et al. (1987). Diagnosing Injury to Eastern Forest Trees. A manual for identifying damage caused by air pollution, pathogens, insects and abiotic stresses. Pennsylvania State University, University Park, 122 pp.
22. Mills, G. et al. (2011). Atmospheric Environment 45, 5064-5068.
23. Braun, S., Schindler, C. und Rihm, B. (2014). Environmental Pollution 192, 129-138.
24. UFAM (2016). Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL), Bundesamt für Umwelt.