

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 166 (2015)

**Heft:** 1

**Artikel:** 40 Jahre Umweltmonitoring im Einflussgebiet einer Kehrlichtverbrennungsanlage

**Autor:** Marti, Jakob / Bertini, Rico / Günthardt-Goerg, Madeleine S.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097507>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# 40 Jahre Umweltmonitoring im Einflussgebiet einer Kehrichtverbrennungsanlage

Jakob Marti

Rico Bertini

Madeleine S. Günthardt-Goerg

Abteilung Umweltschutz und Energie, Departement Bau und Umwelt des Kantons Glarus (CH)

Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen (CH)

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)\*

## 40 Jahre Umweltmonitoring im Einflussgebiet einer Kehrichtverbrennungsanlage

Die Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen (Kanton Glarus) wurde Ende 1973 eröffnet. Sie liegt in der Ebene, am Fuss eines mit Buchen bestockten Berghanges. Die Standortgemeinde Niederurnen verlangte im Rahmen der Baubewilligung ein Beobachtungsprogramm zur Erfassung der Auswirkungen dieser Anlage auf die Umgebung. Aufgrund dieser Forderung wurden ab 1971 schon drei Beprobungen vor der Inbetriebnahme der Kehrichtverbrennungsanlage durchgeführt und anschliessend jährlich bis im Jahr 2011 Buchenblätter von insgesamt 22 Standorten auf Chlorid, Schwermetalle und andere Elemente analysiert. Anfänglich verfügte die Kehrichtverbrennungsanlage nur über eine einfache Rauchgasreinigung. Diese wurde im Rahmen der Erfordernisse der Luftreinhalteverordnung in Etappen verbessert. Die Verringerung der Emissionen zeigte sich sehr deutlich durch die Abnahme der Chlorid- und auch der Zinkkonzentration in den Buchenblättern. Die Konzentration von Chlorid (und Zink) in Blättern ist folglich ein guter Bioindikator für die Umweltbelastung in der Nähe einer Kehrichtverbrennungsanlage.

**Keywords:** beech, elemental analysis, emissions, waste incineration plant, monitoring

**doi:** 10.3188/szf.2015.0032

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail madeleine.goerg@wsl.ch

Zwischen 1955 und 1980 wurden in der Schweiz 48 Kehrichtverbrennungsanlagen errichtet, um die bis anhin vorherrschende Deponierung von Abfällen abzulösen (Bundesamt für Umweltschutz 1981). Später wurden einige Anlagen stillgelegt und weitere neu gebaut. Heute sind 30 Anlagen in Betrieb. Die Abluft dieser Verbrennungsanlagen wurde zunächst nur mit Elektrofiltern gereinigt, womit Partikel und ein Teil der Metalle entfernt werden konnten. Die Emissionen von Chlorverbindungen (Hauptkomponente Chlorwasserstoff) und anderen gasförmigen Schadstoffen wurden ungeschmälert an die Umwelt abgegeben. Die gesamtschweizerischen Emissionen von Chlorverbindungen stiegen zwischen 1955 und 1980 um das 7-Fache. Die Kehrichtverbrennungsanlagen verursachten 1980 über 95% der gesamten Emissionen von Chlorverbindungen (BUWAL 1995a). Die Konzentration von Chlorverbindungen in den Abgasen von Verbrennungsanlagen lag in dieser Phase bei etwa 900 mg/m<sup>3</sup> (BUWAL 1995b). Mit der Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV, SR 814.318.142.1) wurde in der Schweiz erstmals ein Grenzwert für Chlorverbindungen in Abgasen von Kehrichtverbrennungsanlagen festgelegt. Dieser wurde auf 30 mg/m<sup>3</sup>

festgesetzt. Dieser Grenzwert musste von den bestehenden Anlagen nach einer Sanierungsfrist eingehalten werden. In der Regel bedeutete dies den Einbau einer zusätzlichen Reinigungsstufe für die Abgase, wie einer Trockenreinigung oder eines Wäschers. Der Grenzwert wurde 1992 auf 20 mg/m<sup>3</sup> verschärft. Die gesamten Emissionen von Chlorverbindungen in der Schweiz sanken dadurch von einem Maximum im Jahr 1985 (11 700 t) auf 2360 t (1995) und 560 t (2005; BUWAL 1995a).

Die Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen liegt am Rand einer Ebene am Fuss eines Berghanges (Abbildung 1). Sie wurde Ende 1973 eröffnet, später in mehreren Stufen erweitert und mit zusätzlichen Abgasreinigungssystemen ausgerüstet. Sie entsorgt den Abfall aus dem Kanton Glarus und Teilen der Kantone Schwyz, St. Gallen und Graubünden. Das Einzugsgebiet umfasste 2014 rund 240 000 Einwohner, und es wurde in den letzten Jahren jährlich eine Kehrichtmenge von etwa 110 000 Tonnen verbrannt (Abbildung 2). Als Bedingung für die Baubewilligung verlangte die Standortgemeinde Niederurnen, dass schon während dreier Jahre vor der Inbetriebnahme der Anlage (d.h. ab 1971) und anschliessend jährlich Laubproben aus den benachbarten Wäldern auf Chlo-



Abb 1 Die Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen liegt am Fuss eines Berghanges.

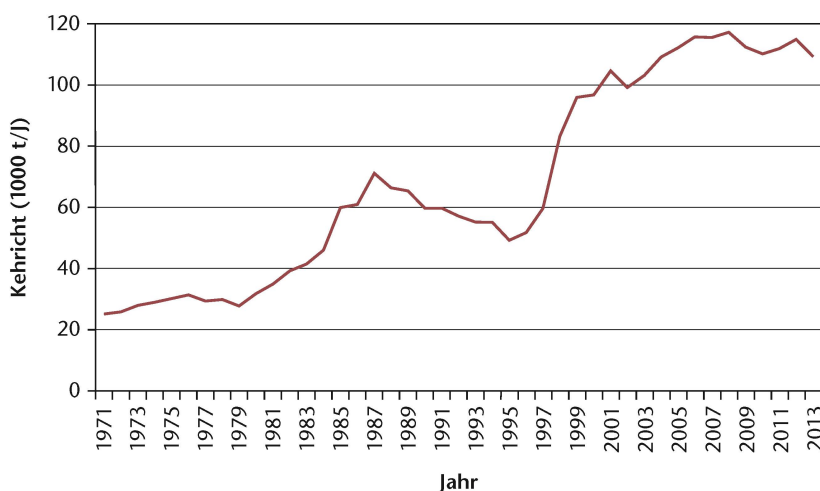


Abb 2 In der Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen verbrannte Kehrichtmengen.

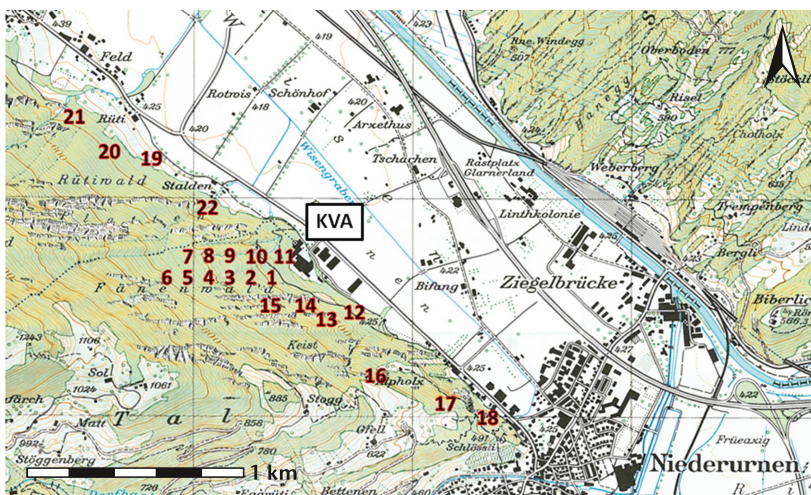


Abb 3 Standorte der beprobten Buchen in der Einflusszone der Kehrichtverbrennungsanlage (KVA). Karte reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (BA 140300)

rid und Schwermetalle untersucht werden. An anderen Standorten (Genf) wurden auch schon länger dauernde Messungen zum Beispiel mit Eichenblättern zur Bioindikation von Schwermetallen durchgeführt (BUWAL 1998, Robin et al 1995). Die 40-jäh-

rige lückenlose Messreihe über verschiedene Phasen der Abgasreinigung wie bei der KVA Niederurnen dürfte aber einzigartig sein.

## Methoden

### Probstandorte

1971 wurde von Mitarbeitern der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) zusammen mit dem lokalen Revierförster ein Netz von 20 Beprobungsstandorten im Berghang oberhalb der Kehrichtverbrennungsanlage ausgewählt (Abbildung 3). Die Standorte verteilen sich in einem Fächer zwischen Nordwest und Südost im Abstand von 0.15 bis 1.2 km zum Kamin und in einer Höhendifferenz von 30 bis 220 m über dem Fuss des Kamins. An diesen Standorten wurden je zwei Buchen (*Fagus sylvatica* L.) im Alter von etwa 100 Jahren zur Beprobung markiert. Im Jahr 1984 wurden zwei zusätzliche Standorte im Nordwesten eingerichtet. Im Laufe der Zeit sind einige Probebäume wegen Windwurf verschwunden oder mussten aus Altersgründen gefällt werden. Bis 1990 wurden jeweils neue Probebäume in der Umgebung markiert. Im Jahr 2011 waren 8 der 22 Probstandorte nicht mehr vorhanden.

### Laubanalyse

Von den markierten Bäumen wurden jedes Jahr Ende August, das heisst vor der Blattverfärbung, rund 200 g Sonnenblätter aus dem obersten Kronendrittel der beiden Bäume pro Standort, zunächst durch Besteigen, später mit dem Helikopter, geerntet (Abbildung 4) und zu je einer Probe gemischt. Die ungewaschenen Laubmischproben der beiden Bäume wurden bei 65 °C getrocknet und mit einer Mühle fein gemahlen. Aus diesem Blattpulver wurde bis 1982 die Konzentration der Chloridionen kolorimetrisch, später mittels High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) bestimmt. Die Konzentration anderer Elemente wurde unregelmässig und seit 1985 jedes zweite Jahr mittels Inductively Coupled Plasma Atomic Absorption (ICP-AA) analysiert. Die Methodik ist in Keller et al (1994) im Detail beschrieben. Seit 1991 wurden diese Elemente im Zentrallabor der WSL (Akkreditierung gemäss ISO 17025) im Doppel mittels Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) analysiert (Abweichung <10%). Die Werte der früheren Jahre wurden mittels Stichproben zum Rückvergleich mit der neuen Methode konsolidiert.

### Emissionsmessungen

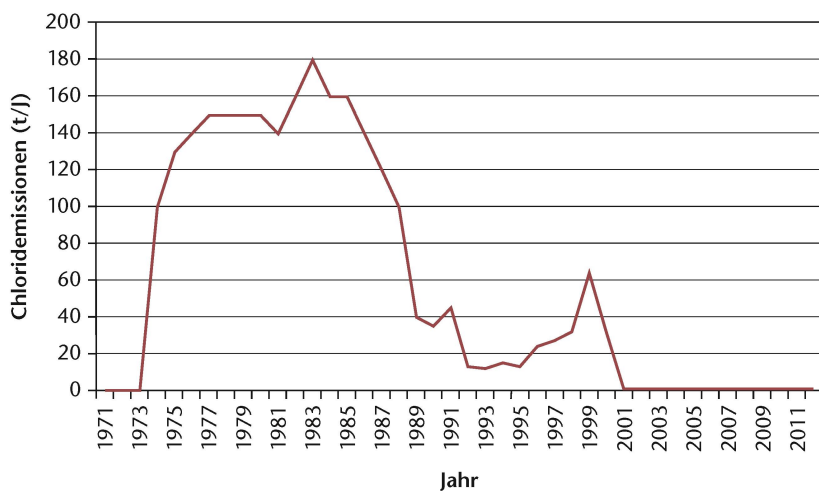
Die gasförmigen Chloridemissionen (Chlorwasserstoff) der Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen wurden gemäss den Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung periodisch gemessen. Zudem



**Abb 4** Probenahme mit dem Helikopter (Foto vom 30. August 2002).

wurde zwischen 1990 und 1999 ein Gerät zur kontinuierlichen Messung eingesetzt. Die Messung wurde unmittelbar vor dem Kamin nach den Vorgaben der damaligen VDI-Richtlinie 3480 (Messen gasförmiger Emissionen) mit einem Messgerät Spectran 677 von Perkin Elmer fotometrisch durchgeführt (Jockel 1991). Die zu messende Abluft wurde mit einer 7 m langen, beheizten Leitung zum Messgerät geführt. Um auch tiefe Werte genau bestimmen zu können, wurde eine beheizte und korrosionsfeste Prozesslangweg-Küvette eingesetzt, die durch Mehrfachreflexion eine Nachweisgrenze von 2 mg/m<sup>3</sup> Chlorid sicherstellte.

Seit 1999 werden die Emissionen von Chlorverbindungen und von Schwermetallen gemäss den Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung und gemäss den Messempfehlungen des Bundesamtes für Umwelt alle drei Jahre als Stichproben von einer beauf-



**Abb 5** Chloridemissionen der Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen.

tragten Messfirma (EMPA Dübendorf) gemessen. Die Messresultate werden jeweils in einem Bericht zusammengestellt (EMPA 2011).

### Statistik

Die Signifikanz wurde getestet mit Varianzanalyse (ANOVA), gefolgt vom Turkey-Test der studentisierten Spannweite (HSD) für N = Anzahl Standorte pro Jahr respektive pro Jahresklasse,  $P < 0.05$ .

### Resultate

#### Chloridemissionen

Die Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen war bei der Inbetriebnahme Ende 1973 mit einem Elektrofilter, aber ohne weiter gehende Rauchgasreinigung ausgerüstet. Damit wurden die Chlorverbindungen aus dem Kehricht praktisch ohne Minderung an die Umwelt abgegeben (Abbildung 5).

1985 wurde eine neue Verbrennungslinie mit weiter gehender Rauchgasreinigung auf der Basis des Trockenverfahrens in Betrieb genommen. Die Chloridkonzentrationen im Abgas sanken langsam bis 1991 auf ca. 10 mg/m<sup>3</sup>. Die Reinigungsleistung wurde aber vermindert durch die Verbrennung von mehr Kehricht und weil von 1986 bis 1989 die alte Verbrennungslinie mit der einfachen Rauchgasreinigung zeitweise auch noch betrieben wurde. Die Leistung der Rauchgasreinigung sank zudem im Laufe der Jahre bis 1999 bedingt durch zunehmende Störungen ab.

Als Vorbereitung für einen Umbau wurde eine Immissionsprognose erstellt (Graf AG 1993). Die gemessenen Windverhältnisse zeigten, dass durch die natürliche Verengung bei Niederurnen (Messungen von Ziegelbrücke) die beiden Windrichtungen Südost und Nordwest dominierten mit Talwind und Bergwind im Tagesgang und unterschiedlichen Übergangssituationen im Sommer und im Winter. Im Jahr 2000 wurde die Anlage vollständig erneuert, der Kamin von 68 m auf 100 m erhöht und eine neue Nassreinigung der Abgase in Betrieb genommen. Die Emissionen sanken markant und lagen dann in der Regel unter der Nachweisgrenze des Messverfahrens.

Die berechneten Daten der Chloridfrachten (Abbildung 5) dürften für den Zeitraum 1974–1985 (keine Verminderung der Chloridemissionen) relativ zuverlässig, für den Zeitraum 1985–1990 (Trockenreinigung, aber keine kontinuierliche Messung der Abgase) mit einem beträchtlichen und für den Zeitraum 1990–1999 (Messung der Abgase einer Ofenlinie) mit einem kleineren Fehler behaftet sein.

#### Chloridkonzentration im Laub

Aus den Messwerten der Standorte wurde ein Mittelwert ermittelt (Abbildung 6). Dieser Mittelwert lag vor der Inbetriebnahme der Anlage bei 179 mg

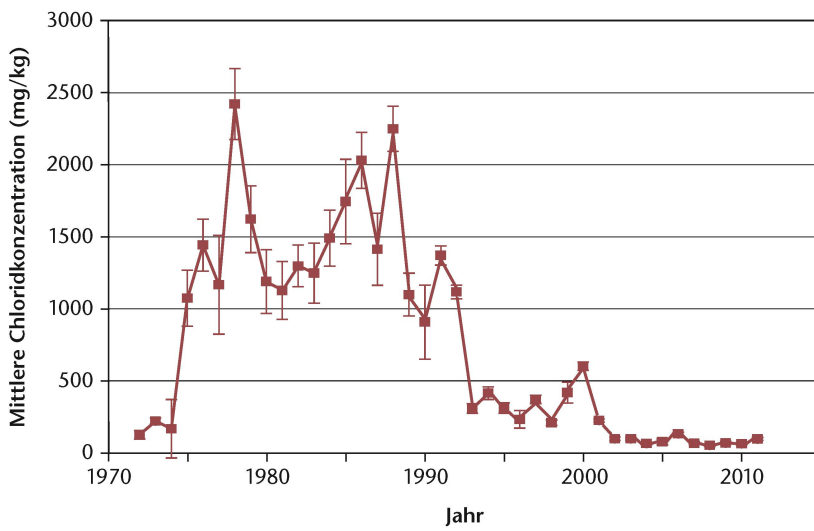


Abb 6 Mittlere Chloridkonzentrationen im Laub aller markierten Buchen (Mittelwerte und Standardfehler).

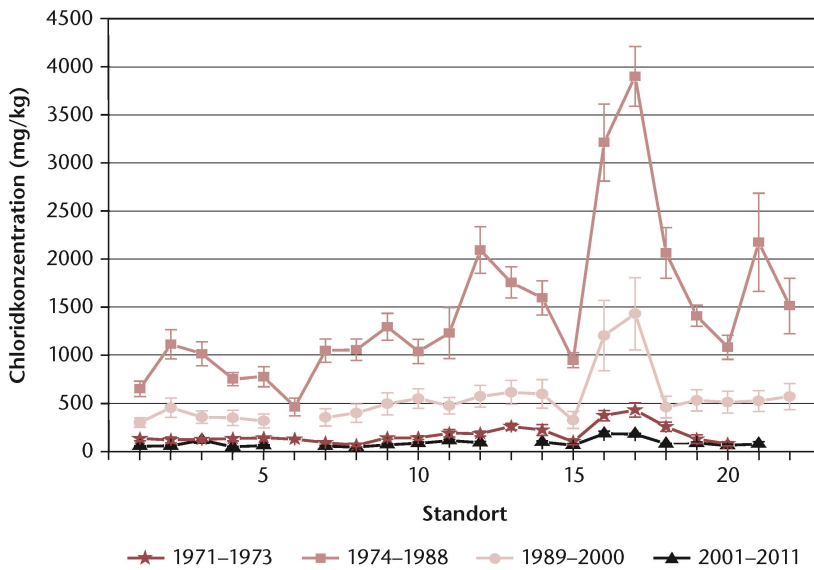


Abb 7 Chloridkonzentrationen im Buchenlaub je Standort während der verschiedenen Phasen der Emissionen (Mittelwerte und Standardfehler).

Chlorid pro kg Blatt-Trockengewicht und stieg nach der Inbetriebnahme auf den maximalen Wert von 2400 mg/kg im Jahr 1977 an. Der Durchschnitt der ersten 15 Jahre Betrieb der Kehrichtverbrennungsanlage (1974–1988) mit hohen Emissionen betrug 1500 mg/kg. Obwohl die Emissionswerte schon ab 1989 stark abnahmen, sank die Chloridkonzent-

ration im Laub mit zeitlicher Verzögerung erst im Jahr 1992 deutlich und erreichte als Mittelwert 1992–2000 nur noch 340 mg/kg. Seit dem Jahr 2001 wurden sogar ständig Werte unterhalb des Ausgangszustandes von 1971–1973 erreicht.

### Lokale Verteilung der Chloridwerte

Die langen Fehlerbalken in Abbildung 6 zeigen, dass die Chloridwerte im Buchenlaub je nach Standort stark variierten. In der Phase der hohen Emissionen zwischen 1974 und 1988 wiesen die Blätter der Standorte mit den Nummern 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 21 und 22 Chloridkonzentrationen von mehr als 1400 mg/kg auf (Abbildungen 7 und 3). Es sind dies die Standorte südlich und südwestlich der Kehrichtverbrennungsanlage talaufwärts (12, 13, 14 und 16, 17, 18) und talabwärts zwischen 480 und 520 m ü. M., d.h. auf der Höhe des alten Kamins (480 m ü. M.) und wenig oberhalb (19, 21, 22), während der Standort Nr. 15 mit 650 m ü. M. und etwas im Windschatten nicht betroffen war. Der Standort Nr. 20, talabwärts auf 520 m ü. M., war gerade hoch genug, um stärkeren Chloridemissionen zu entgehen, im Gegensatz zu den weniger hohen Standorten 19, 21 und 22, die unter 480 m ü. M. liegen. Die Standorte 1 bis 11 liegen direkt oberhalb der Anlage in deren Windschatten und waren von den Emissionen weniger betroffen. Die Standorte 16, 17 und 18 hingegen befanden sich am «Immissionskopf», wo die Winde auf den in die Ebene vordringenden Wald treffen (Abbildungen 7 und 3). An den Standorten mit den höchsten Chloridkonzentrationen im Laub (16 und 17) dauerte es nach dem Einbau der Filteranlagen noch einige Jahre, bis sich die Chloridwerte im Laub verminderten. Hier war die Belastung gross genug, dass Chlorid auch noch baumintern vorhanden war und möglicherweise vom Boden her aufgenommen wurde, sodass die früheren Immissionen noch im Jahr 2011 sichtbar waren (Abbildung 7: erhöhte Mittelwerte der Standorte 16 und 17).

### Metall- und Nährelementkonzentrationen im Laub

Ein Vergleich der Chlorid- und Schwermetallemissionen mit den mittleren Konzentrationen im Laub aller Standorte (Tabelle 1) zeigt, dass durch die

Jahresklassen	versus	Cl-	Al	B	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	N	Na	Ni	P	Pb	S	Zn
1971–1973	1974–1988	***↑				ns	***↑		ns		ns	ns	ns	***↑			ns	***↓		***↑
	1989–2000	***↑				ns	ns		ns		ns	ns	ns	ns			***↓	***↓		ns
	2001–2011	ns				ns	Dg		ns		ns	ns	ns	ns			***↓	Dg		***↓
1974–1988	1989–2000	***↓	ns	ns	ns	ns	***↓		ns	***↓	ns	ns	ns	***↓	***↑		***↓	***↓	***↑	***↓
	2001–2011	***↓	***↑	***↑	ns	ns	Dg		ns	ns	ns	ns	ns	***↓	ns		***↓	Dg	***↑	***↓
1989–2000	2001–2011	***↓	***↑	***↑	***↑	ns	Dg	***↓	ns	***↑	ns	ns	ns	***↓	ns	***↓	ns	Dg	***↑	***↓

Tab 1 Turkey-Test der studentisierten Spannweite (HSD) für N = Anzahl Standorte. Signifikant verschiedene Mittelwerte ( $P < 0.05$  \*\*\*; ↑ = Zunahme, ↓ = Abnahme) der analysierten Elemente im Vergleich der Jahresklassen, ns = nicht signifikant, leere Felder = nicht bestimmt, Dg = Werte  $\leq$  Detektionsgrenze.

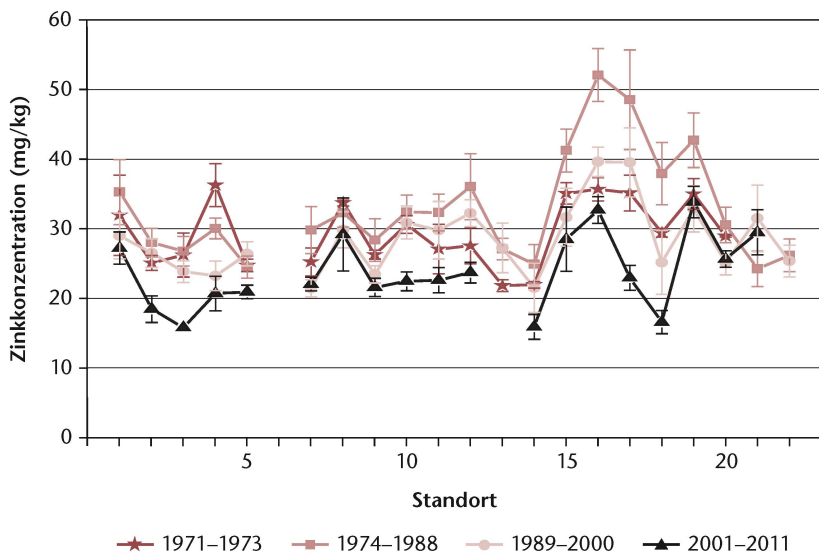


Abb 8 Zinkkonzentrationen im Buchenlaub während der verschiedenen Phasen der Emissionen (Mittelwerte und Standardfehler).

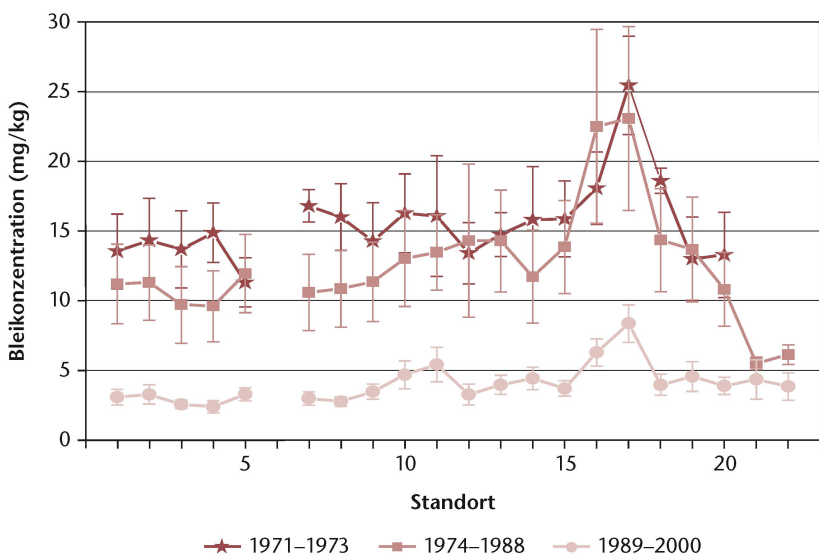


Abb 9 Bleikonzentrationen im Buchenlaub während der verschiedenen Phasen der Emissionen (Mittelwerte und Standardfehler). Seit 2001 unter der Detektionsgrenze von 3 mg/kg.

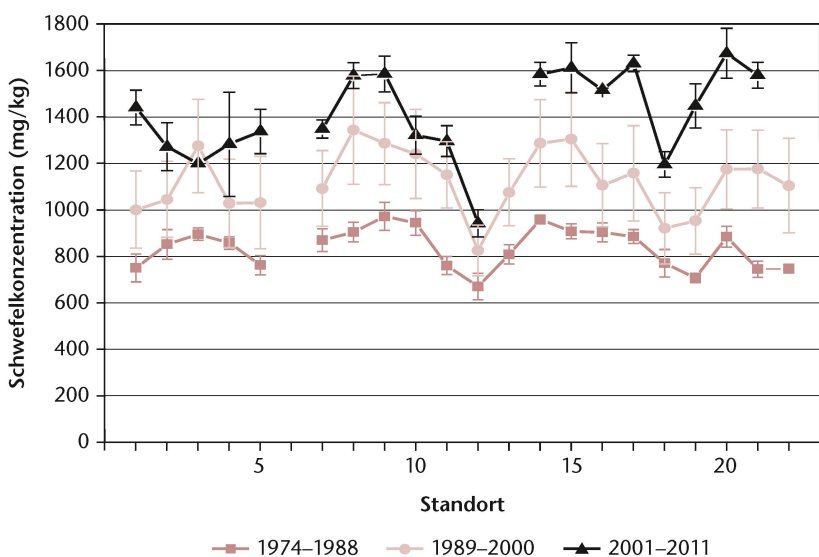


Abb 10 Schwefelkonzentrationen im Buchenlaub während der verschiedenen Phasen der Emissionen (Mittelwerte und Standardfehler).

emittierten Stäube in der Phase der hohen Emissionen (1974 bis 1988) auch hohe Konzentrationen von Zink ins Laub gelangten. Während der nachfolgenden Periode mit verbesserter Abgasreinigung nahmen die Zinkkonzentrationen ab und sanken seit 2001 unter diejenigen vor der Inbetriebnahme der Kehrlichtverbrennungsanlage (Abbildung 8). Desgleichen erreichte Cadmium bis 1988 Konzentrationen von 0.23 mg/kg im Laub, sank dann ab 1991 unter die Detektionsgrenze von 0.15 mg/kg und seit 2001 unter die neue, tiefere Detektionsgrenze von 0.06 mg/kg. Ähnlich waren die Chrom- und Nickelkonzentrationen im Laub der Jahre 2001 bis 2011 (Chrom:  $0.58 \pm 0.04$ , Nickel:  $0.75 \pm 0.5$ ) signifikant geringer als 1989 bis 2000 (Chrom:  $1.20 \pm 0.20$ , Nickel:  $3.04 \pm 0.57$ ). Blei wird im Gegensatz zu Zink wenig in die Pflanzen aufgenommen. Die Blei-gehalte im Buchenlaub änderten sich kaum durch den Betrieb der KVA (Abbildung 9). Sie nahmen dank der Reduktion im Treibstoff seit den frühen 70er-Jahren ab und unterschritten seit dem Jahr 2001 die Detektionsgrenze von 3 mg/kg.

Die Schwefelkonzentrationen stiegen seit 1974 im Laub aller analysierten Bäume stetig (Abbildung 10, 1971–1973 wurden sie nicht bestimmt). Auch Aluminium und Bor verhielten sich ähnlich. Sie waren in den letzten Jahren höher (1997–2011: Aluminium  $116 \pm 6$  und Bor  $13 \pm 0.7$  mg/kg) als zuvor (1984–1996:  $65 \pm 3$  bzw.  $9.4 \pm 0.4$  mg/kg). Natriumhöchstwerte traten im Jahr 2009 ( $39 \pm 4$ ) und 2011 ( $48 \pm 3$  mg/kg) auf, gegenüber einem Mittelwert von  $32 \pm 3$  in den Jahren 1984–2007.

Die für das Pflanzenwachstum wichtigen Nährstoffe Calcium, Kalium, Magnesium, Mangan Eisen und Kupfer variierten während der 40 Jahre nur sehr wenig. Die Konzentration der Hauptnährstoffe Stickstoff und Phosphor war hingegen während der Betriebsjahre 1974–2000 der Kehrlichtverbrennungsanlage, möglicherweise auch wegen anderer Emittenten, an manchen Standorten höher als 2001–2011 (Abbildung 11).

### Schwermetallemissionen

Der erste Ofen der Kehrlichtverbrennungsanlage war mit einem Elektrofilter einfacher Bauart ausgerüstet. Die Staubemissionen betragen rund  $400 \text{ mg/m}^3$ , d.h. 2400 g/t Kehrlicht in den Jahren 1975 bis 1985. Die spezifischen Emissionen von Cadmium, Blei und Zink lagen bei 5, 90 bzw. 160 g/t. Dank der neuen Ofenlinie mit besserem Elektrofilter und weiter gehender Rauchgasreinigung im Trockenverfahren sanken die Werte auf 0.4, 6 bzw. 3 g/t in den Jahren 1986 bis 1999 und mit der Erneuerung der Anlage ab dem Jahr 2000 in die Nähe der Detektionsgrenze von 0.004, 0.03 bzw. 0.14 mg/m<sup>3</sup>, was einer Fracht von <0.01, 0.2, <0.1 g/t entspricht (Abbildung 12).

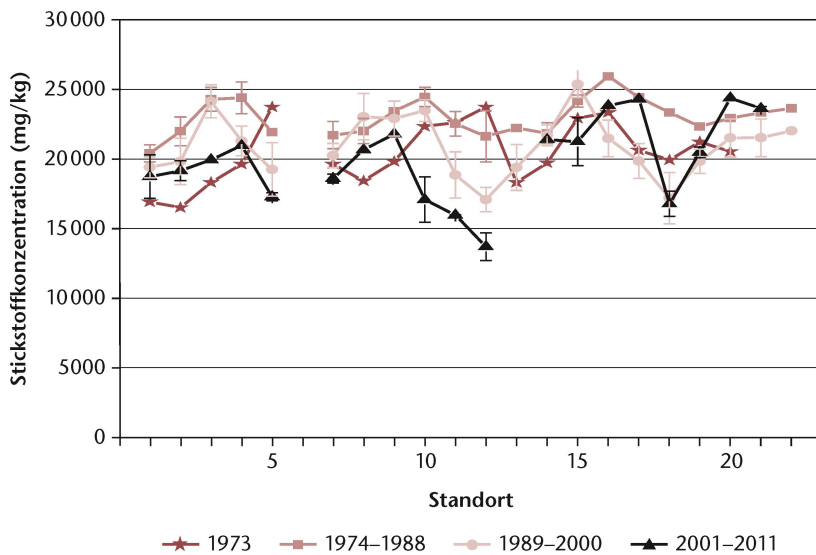


Abb 11 Stickstoffkonzentration im Buchenlaub während der verschiedenen Phasen der Emissionen (Mittelwerte und Standardfehler).

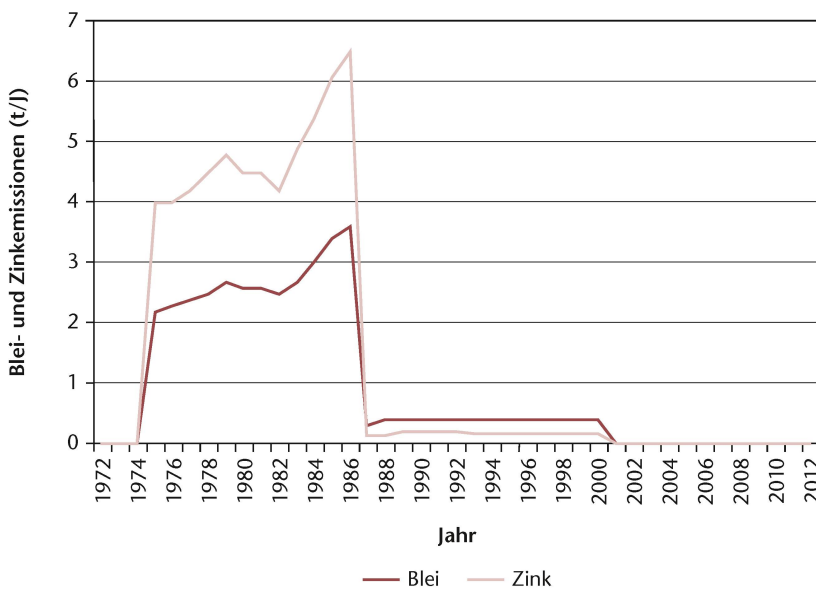


Abb 12 Blei- und Zinkemissionen der Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen.

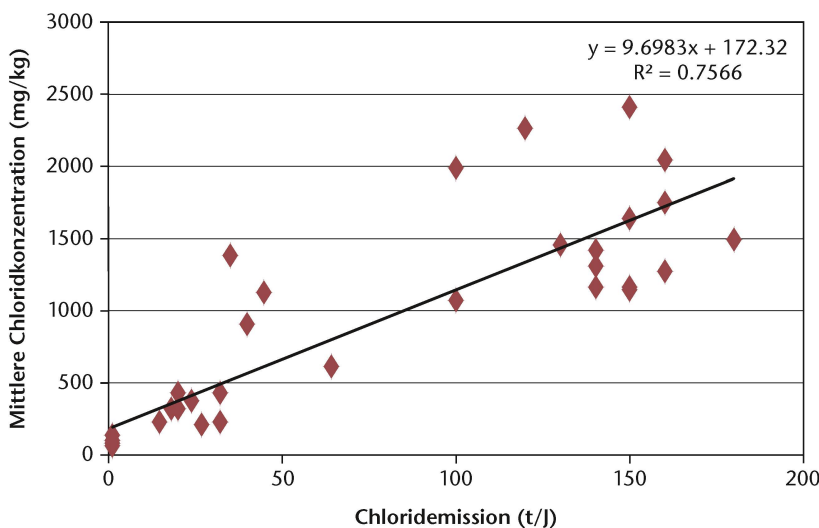


Abb 13 Vergleich der berechneten jährlichen Chloridemissionen der Kehrichtverbrennungsanlage mit den gemessenen Chloridmittelwerten im Buchenlaub.

### Vergleich der Chloridkonzentrationen im Laub mit den Chloridemissionen der Kehrichtverbrennungsanlage

Die mittleren Chloridkonzentrationen im Laub korrelierten mit den Veränderungen in den Emissionen recht gut (Abbildung 13), trotz den ungenauen Emissionsmessungen von 1985 bis 1990. Ein Vergleich der Chloridkonzentrationen in Laub mit den Emissionen zeigte, dass die Konzentrationen mit steigender Emission grösser wurden, dass aber die Kurve oberhalb von rund 100 t/Jahr abflachte.

### Diskussion

Das Laub insbesondere von Bäumen filtert gas- und staubförmige Emissionen aus der Luft. Der Chloridgehalt der Blätter von Buchen eignet sich deshalb als Bioindikator für die Umweltbelastung mit Abgasen aus der Kehrichtverbrennung, von denen Chlorwasserstoff eine Leitkomponente ist. Dies trifft im vorliegenden Fall besonders zu, weil in der Umgebung keine anderen Chloridemittenten vorhanden sind, welche die langfristige Entwicklung beeinflusst haben. Auch das Meer mit seinem Einfluss auf den Chloridgehalt der Luft liegt weitab vom Untersuchungsgebiet. Der Chloridgehalt der Blätter hat sich im vorliegenden Fall ausgezeichnet bewährt, um die langfristige Entwicklung von Emissionen widerzuspiegeln, zumal in den ersten zehn Betriebsjahren der Anlage nur wenige Emissionsmessungen durchgeführt worden sind. Insbesondere bei Emissionen unterhalb 100 t/Jahr korrelierten die Emissionswerte sehr gut mit den Konzentrationen im Laub, während bei höheren Werten die Kurve abflachte, weil dann anscheinend die Grenze der Speicherfähigkeit der Blätter erreicht wurde.

Der tolerierte Chloridgehalt in Buchenblättern wird im österreichischen Bioindikationsnetz angegeben mit 1000 mg/kg.<sup>1</sup> Erst bei Werten oberhalb dieser Toleranz könnten Schädigungen (Blattrandnekrosen) auftreten. Letztere wurden jedoch in dieser Überwachung nicht beobachtet.

Es ist anzunehmen, dass der Grossteil der Chloremissionen die Anlage in gasförmigem Zustand als Chlorwasserstoff oder als gasförmige anorganische Chloride verlässt. Dies wurde beim Vergleich der kontinuierlichen Messung, welche nur den gasförmigen Anteil misst, mit der periodischen, welche die gesamte Chloridmenge bestimmt, ermittelt. Es gibt kaum Untersuchungen über die Lebensdauer von Chlorwasserstoff in der Umgebungsluft. Bei den herrschenden Umweltbedingungen dürfte das Chlorwasserstoffgas aber sehr schnell mit Wasser, Ammoniak oder anderen Stoffen reagieren und die Chloridionen gelöst von den Blättern aufgenommen werden.

<sup>1</sup> www.bioindikatornetz.at (18.11.2014)

Keller et al (1994) haben gezeigt, dass das Chlorid von den Blättern aufgenommen und nicht auf der Oberfläche abgelagert wird, weil die Konzentration durch Niederschläge kaum beeinflusst war. Hier zeigen wir, dass der Chloridgehalt in den Blättern mit den Emissionen korrelierte, obwohl im Winter – durch den laublosen Zustand der Buchen – kein Chlorid in die Blätter aufgenommen werden kann. Des Weiteren dürfte der Chloridgehalt im Laub durch bauminterne Verlagerungen beeinflusst sein, und es könnten Chloridionen aus dem Boden aufgenommen worden sein. Letzteres führte zu einer verzögerten Abnahme der Konzentrationen im Laub der Bäume an den beiden am meisten belasteten Standorten nach der Installation der Abgasreinigung.

Der Vergleich mit der Immissionsprognose der Graf AG (1993) zeigte grosse Übereinstimmungen, aber auch einige Unterschiede, die zum Teil auf die unterschiedlich untersuchten Immissionsvorgänge zurückzuführen sind. Die Immissionsprognose wurde erstellt mit Berücksichtigung der Kamin-erhöhung und beurteilte die physikalische Deposition auf dem Boden, die Chloridanalyse im Laub hingegen die Aufnahme von Chlorid in ein biologisches System. Abgesehen von diesen methodischen Unterschieden zeigte der Vergleich, dass sich die hohen Chloridkonzentrationen in den Blättern über eine grössere Fläche erstreckten als die berechneten Depositionen, welche eine hohe Spitze in der Nähe der Anlage aufwiesen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Blattoberfläche von Bäumen das Chlorid selektiver aufnimmt als eine Bodenoberfläche und dass die in der Immissionsprognose angenommenen Windverhältnisse die Verfrachtung unterschätzt hatten. Gemäss der Windanalyse von Ziegelbrücke und der Zündung von Rauchkörpern an zwei Tagen (Graf AG 1993) hätten die Bäume der Standorte 1 bis 11 und 20 (Abbildung 3) mindestens kurzfristig von hohen Schadstoffbelastungen betroffen sein müssen. Sie profitierten aber vom Windschatten des Kamins und davon, dass das ausgeprägte Berg-Tal-Windsystem mit überdurchschnittlichen Windgeschwindigkeiten den kurzfristigen Einflüssen der Hangwinde entgegenwirkte.

Neben den gasförmigen Emissionen von Chlorid, Schwefel und Stickstoff wurden andere Elemente als Stäube emittiert und teilweise von den Pflanzen via Boden in das Laub aufgenommen. Als Vertreter der Staubpartikel könnten Zink, Blei und Cadmium zur Bioindikation der Emissionen der Kehrichtverbrennungsanlage dienen. Die mit der verbesserten Abgasreinigung abnehmenden Zink- und Cadmiumkonzentrationen im Laub (und die geringen Werte seit 2001) zeigten, dass diese Metalle nicht im Boden angereichert wurden respektive von dort aus nicht vermehrt für die Wurzeln verfügbar waren, obwohl Zink für die Pflanzen ein Mikronährstoff ist. Blei wird hingegen nicht von den Wurzeln bis in die

Blätter transportiert und ist durch andere Emittenten (Strassenverkehr) stark mitbeeinflusst. Einen Hinweis auf die starke Belastung durch den Strassenverkehr geben die Werte vor der Inbetriebnahme der Kehrichtverbrennungsanlage. Auch in benachbarten europäischen Ländern (z.B. Frankreich; ONF 2008) waren die Bleiemissionen seit 1999 gering. Da die Konzentrationen von Cadmium gering waren, bleibt Zink als bester Indikator. Zink widerspiegelte zusammen mit geringen Konzentrationen von Chrom und Nickel die Chloridgehalte, was bedeutet, dass die Stäube ebenso mit dem Wind in der Umgebung der Kehrichtverbrennungsanlage verteilt wurden wie die gasförmigen Emissionen.

Während die Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen im Laub zur Zeit der ungefilterten Emissionen der Kehrichtverbrennungsanlage am höchsten waren und dann dank den Filtern abnahmen, zeigt sich beim Schwefel ein anderes Bild. Seit 2001 ist dessen Konzentration im Laub erhöht, obwohl die Schwefeldioxidkonzentrationen in der Luft im Allgemeinen und die Schwefelemissionen der Kehrichtverbrennungsanlage im Speziellen deutlich geringer waren. Desgleichen ist für die in den letzten 14 Jahren erhöhten Aluminium- und Borkonzentrationen unbekannt, ob sie mit der Zusammensetzung des Kehrichts zusammenhängen oder auf andere Schadstoffquellen zurückzuführen sind. Natrium korrelierte nicht mit Chlorid, d.h., es wurde nicht zusammen mit Chlorid emittiert. Die hohen Natriumwerte im Laub in den Jahren 2009 und 2011 könnten eher mit dem Salzen der Strassen in diesen überdurchschnittlich schneereichen Wintern und der Aufnahme des Natriums via Wurzeln zusammenhängen. Die anderen untersuchten Nährelemente blieben über die 40-jährige Beobachtungsdauer konstant. Die Analysewerte der Blätter zeigen allgemein einen guten Ernährungszustand der Bäume an. Keines der bestimmten Elemente verursachte Mangelerscheinungen oder erreichte toxische Werte.

Die Chlorid- (und die Zink-)Konzentrationen im Laub der Bäume sind deshalb gute Bioindikatoren zur Überwachung von deren Emittenten. ■

*Eingereicht: 28. August 2014, akzeptiert (mit Review): 11. November 2014*

## Dank

Wir danken dem Kehrichtzweckverband Linthgebiet für die langjährige Finanzierung dieser Untersuchungen sowie Theo Keller und Rainer Matyssek von der WSL, welche dieses Projekt mit grossem Fachwissen begleitet hatten. Wir danken auch den vielen Mitarbeitern des Forstbetriebes Niederurnen, welche die nicht ganz ungefährliche Arbeit der Ernte des Probematerials durchgeführt haben, und dem WSL-Zentrallabor, welches die Blattanalysen seit 1991 gewissenhaft ausgeführt hat.

## Literatur

- BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (1981)** Kommunale Abfallentsorgung in der Schweiz. Bern: Bundesamt Umweltschutz. 318 p.
- BUWAL (1995A)** Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Schriftenreihe Umwelt 256. 121 p.
- BUWAL (1995B)** Handbuch Emissionsfaktoren für stationäre Quellen. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Vollzug Umwelt. 341 p.
- BUWAL (1998)** Die saubere Kehrichtverbrennung: Mythos oder Realität. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Schriftenreihe Umwelt 299. 117 p.
- EMPA (2011)** Emissionsmessungen bei der Kehrichtverbrennungsanlage Niederurnen, 12. September 2011. Dübendorf: EMPA. 36 p.
- GRAF AG (1993)** KVA Niederurnen: Ausbreitungsrechnungen, Anhang 1 zu UVB. Gerlafingen: Graf AG. 45 p.
- JOCKEL W (1991)** Stand der Chlorwasserstoff-Emissionsüberwachung bei Abfallverbrennungsanlagen. Entsorgungspraxis 12: 772–775.
- KELLER T, MATYSSEK R, GÜNTHARDT-GOERG MS (1994)** Langjährige Analyse von Buchenlaub aus der Umgebung einer Kehrichtverbrennungsanlage. Schweiz Z Forstwes 145: 351–369.
- ONF (2008)** 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR. Paris: Office national des forêts, Rendez-vous techniques, hors-série no 4. 178 p.
- ROBIN D, MARTIN M, HAERDI W (1995)** Métaux lourds dans le sol au voisinage d'une usine d'incinération. Bilan après 10 années de prélèvement. Arch Sci Genève 48: 19–28.

### 40 ans de surveillance environnementale dans la zone d'influence d'une usine d'incinération des ordures

L'usine d'incinération des ordures (UIOM) à Niederurnen (canton de Glaris) a été mise en service à la fin de 1973. Elle est située dans la plaine de la Linth, au pied d'un coteau boisé de hêtres. Les autorités de la commune de Niederurnen ont exigé dans le cadre de la procédure d'autorisation qu'un programme d'observation soit mis en place, afin de mesurer l'impact des émissions de l'UIOM sur l'environnement. C'est pourquoi, dès 1971 déjà trois échantillonnages de feuilles d'arbres ont été recueillis. De 1973 à 2011, chaque année, sur 22 sites, des échantillonnages ont été prélevés, afin de déterminer leur teneur en chlorures, métaux lourds, ainsi que d'autres éléments. Lors de sa mise en service, l'UIOM n'était équipée que de filtres simples pour le traitement des fumées. Conformément aux exigences de l'Ordonnance de la protection de l'air, les filtres ont été continuellement perfectionnés. La diminution des émissions a pu être documentée et elle est significative pour les valeurs des chlorures et de zinc dans les feuilles d'arbres. La concentration de chlorures (et zinc) dans les feuilles d'arbres est alors une bonne bio-indication permettant de mesurer la pollution due à une UIOM.

### 40 years of environmental monitoring in the area of influence of a waste incineration plant

The waste incineration plant (WIP) of Niederurnen (canton of Glarus, Switzerland) was opened at the end of 1973. It is situated in a plain at the foot of a mountain slope covered with beech trees. In the context of the licensing procedure, the local community requested a monitoring program to document the effects the plant would have on the environment. As a consequence, starting in 1971, three examples of sampling were carried out before the WIP came into operation at the end of 1973 and a monitoring program on the basis of the analysis of chloride, heavy metals and other elements in the leaves of mature beech trees was started. At 22 sites around the plant, leaves were harvested annually over a period of 40 years. Initially, the plant system had only simple flue-gas cleaning. Following Swiss air pollution control legislation, the cleaning system was improved in several steps. These improvements resulted in marked decreases in the concentrations of foliar chloride and zinc. Foliar chloride (and zinc) concentration may be considered as a good bioindicator for the environmental effects of a WIP.