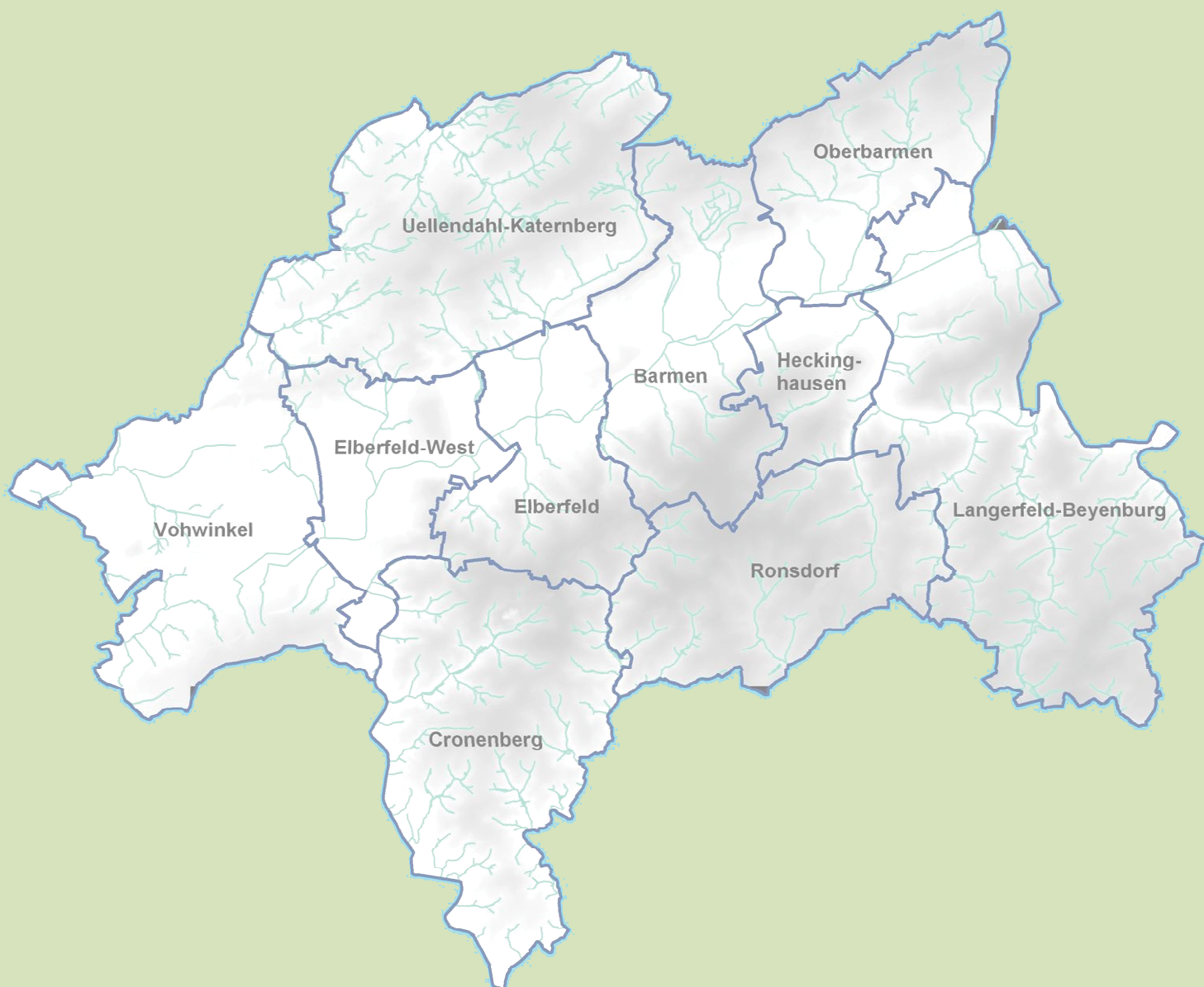




Waldkalkungen in der Stadt Wuppertal

Stadt Wuppertal

Albert Vosteen (Ressort Grünflächen und Forsten)

Reinhard Gierse (Ressort Umweltschutz)

1 Hintergrund und Geschichte

Mit der Frühindustrialisierung wurden im großen Umfang Schadgase/-stoffe über die Luft als Emissionen freigesetzt. Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts entstanden dabei erste Rauchschäden durch schwefelhaltige Industrieabgase aus Barmer Fabrikschornsteinen, die zum Absterben fast aller Nadelbäume im Barmer Wald und zu Versauerungsschüben in den Böden führte. Deshalb gibt es im Barmer Wald bis heute nur noch ganz vereinzelte, überlebende Nadelbäume.

In der Notzeit nach dem Zweiten Weltkrieg wurden vierzig Prozent der Wuppertaler Stadtwälder durch Kahlschläge vernichtet. Die Baumwurzeln wurden ausgerodet, um so Brennholz für die frierende Bevölkerung zu erhalten. Dies führte zu ebenfalls schweren Bodenschäden durch Bodenerosion, Bodenversauerung und zu einer starken Abnahme sowohl der Humusvorräte, als auch der Nährstoffvorräte. Einen Höhepunkt erreichten die „Neuartigen Waldschäden“ in den Jahren zwischen 1980 und 1990, als die Niederschläge europaweit so sehr mit Schwefelsäure und sauren Stickstoffverbindungen aus Verbrennungsprozessen angereichert waren, dass die Böden extrem versauerten. In dieser Zeit starben mehrere Fichtenbestände am Adelenblick in Cronenberg ab.

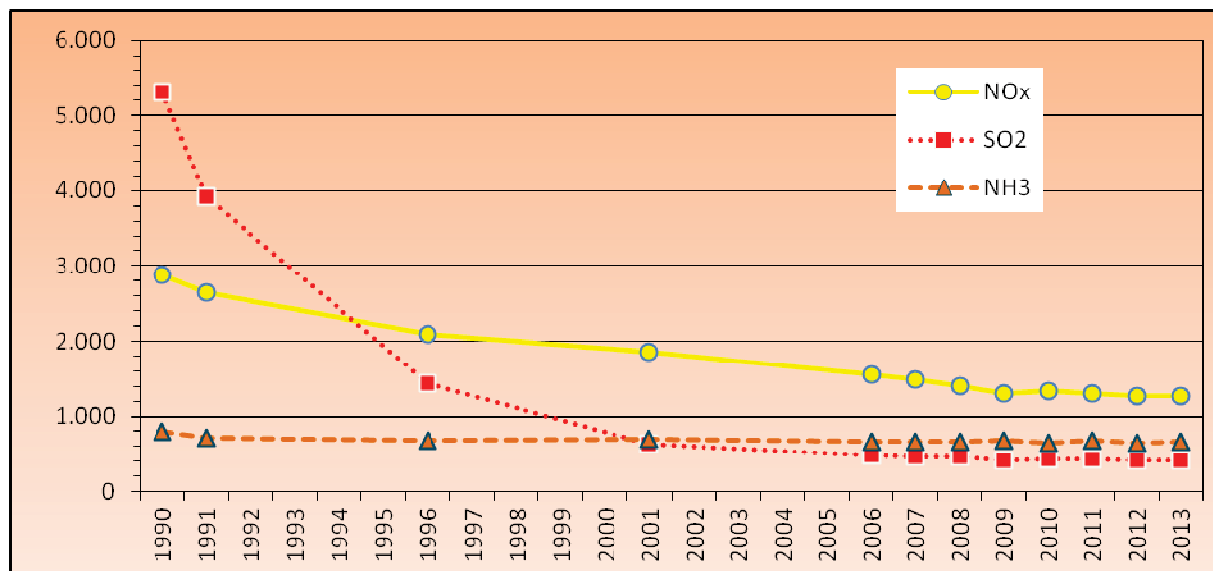


Abb. 1: Nationale Trendtabelle für die dt. Berichterstattung atmosphärische Emissionen in kt. Quelle: Umweltbundesamt, Dessau, 2015 (verändert Gierse)

Seit dem Ende der 1980 / Beginn der 1990er Jahre nehmen die Emissionen der Schadgase (insbesondere Schwefeldioxid) ab (s. Abb. 1). Hierdurch wurden auch die Gesamtsäureeinträge deutlich reduziert, wobei die säurehaltigen Einträge durch die Emission der Stickoxide nur leicht gesunken sind (s. Abb. 2).

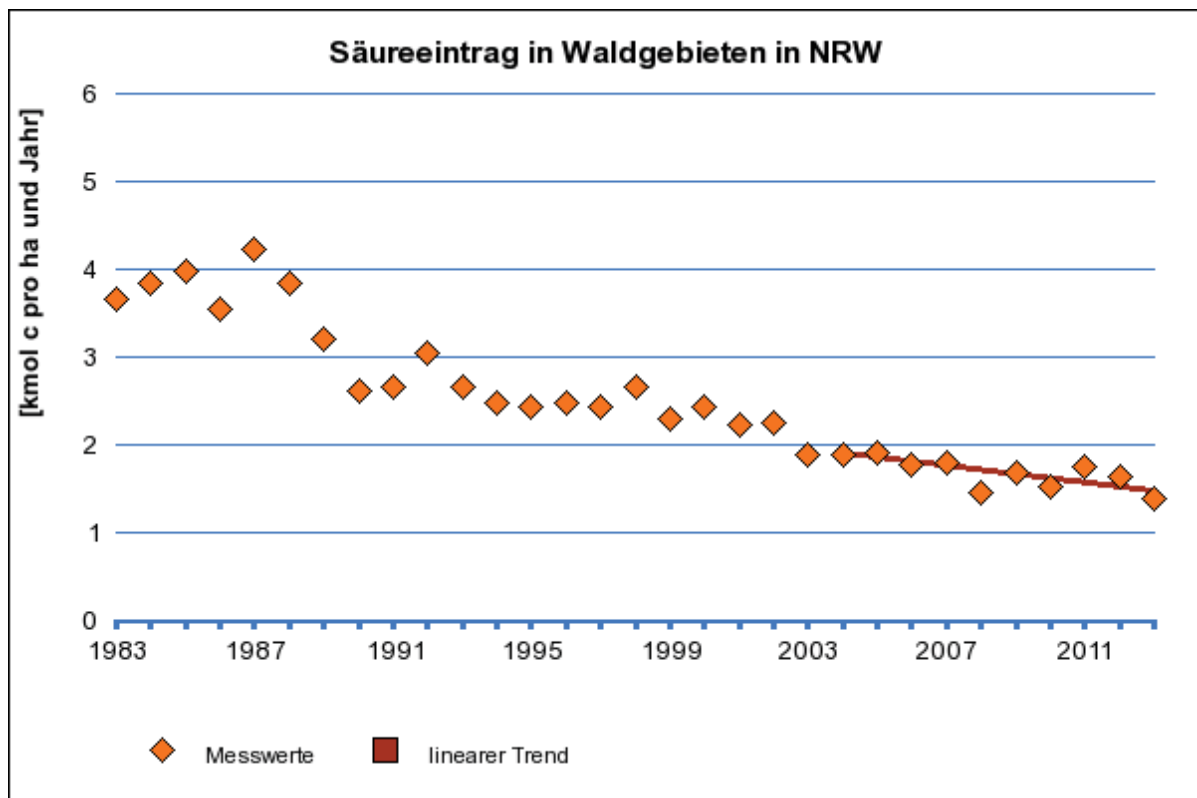


Abb. 2: Säureeinträge in Waldgebieten NRW Landesumweltamt, Essen, 2013

(<http://www.lanuv.nrw.de/umweltindikatoren-nrw/index.php?indikator=28&mode=indi>)

Das Maß für die Säure in der Bodenlösung ist die Anzahl der Wasserstoff-Ionen in der Bodenlösung (pH-Wert), wobei pH=7 einen neutralen Zustand widerspiegelt (s. Tab. 1).

Tab. 1: Einstufung & Bewertung des pH-Wertes (verändert nach Bodenkundliche Kartieranleitung 2005)

Bezeichnung	pH-Wert-Bereich
Extrem alkalisch	$\geq 10,7$
Sehr stark alkalisch	$10,0 - < 10,7$
Stark alkalisch	$9,3 - < 10,0$
Mäßig alkalisch	$8,6 - < 9,3$
Schwach alkalisch	$7,9 - < 8,6$
Sehr schwach alkalisch	$7,2 - < 7,9$
Neutral	$6,8 - < 7,2$
Sehr schwach sauer	$6,1 - < 6,8$
Schwach sauer	$5,4 - < 6,1$
Mäßig sauer	$4,7 - < 5,4$
Stark sauer	$4,0 - < 4,7$
Sehr stark sauer	$3,3 - < 4,0$
Extrem sauer	$< 3,3$

Tab 2: Pufferbereiche im Boden (verändert nach Bodenkundliche Kartieranleitung 2005)

Carbonat-Pufferbereich pH-Werte 8,6 - 6,2	Pufferkapazität 150 kmol H^+ per 1 % CaO Nährstoffverhältnisse: Ca^{2+} -, HCO_3^- -Überschuss, K und Spurenelemente Anionenüberschuss (Phosphat-, Fe-Fällung)
Silikat-Pufferbereich pH-Werte 6,2 - 5,0	Pufferkapazität 25 kmol H^+ per 1 % Silikat Nährstoffverhältnisse: wenig Ca, Mg, K Kationen-/Anionenverhältnis ausgeglichen
Austauscher-Pufferbereich pH-Werte 5,0 - 4,2	Pufferkapazität 7 kmol H^+ per 1 % Ton Nährstoffverhältnisse: Auswaschung von Ca, Mg, K Kationenüberschuss (Al)
Aluminium-Pufferbereich pH-Werte 4,2 - 3,0	Pufferkapazität 150 kmol H^+ per 1 % Ton Nährstoffverhältnisse: starke bis vollständige Kationenauswaschung Überschuss an Al^{3+} (Toxizität)
Eisen-Pufferbereich pH-Wert $< 3,0$	Nährstoffverhältnisse: extremer Nährstoffmangel und Fe-, Al-Toxizität, Fe^{3+} und H^+ vorherrschend

Der Boden kann Säuren über verschiedene Mechanismen neutralisieren und bis zu gewissen Grenzen unschädlich machen (s. Tab. 1). Dabei sinkt der pH-Wert im Boden allerdings immer weiter ab. Dies führt zunächst zu einem Verlust der Austausch-Plätze für Nährstoffe (pH 5,0-4,2) und damit auch zu einer verringerten Nährstoffspeicherfähigkeit. Leicht lösliche Schwermetalle (z. B. Cadmium, Zink) werden verlagert bzw. ausgewaschen. Liegen die pH- Werte unter 4,2 werden die essentiellen Nährstoffe Calcium, Magnesium und Kalium fast vollständig ausgewaschen. Das in den Silikaten des Mineralbodens gebundene Aluminium und Eisen (ab pH < 3,0) wird freigesetzt und gelangt in die Bodenlösung, wo es auf die Pflanzenwurzeln toxisch wirkt. Durch die Wurzelschädigung kommt es zu Störungen des Nährstoffkreislaufs in den Pflanzen, so dass die schon in der Bodenlösung noch kaum vorhandenen Nährstoffe (Calcium, Magnesium und Kalium) nicht mehr ausreichend aufgenommen werden können.

Der überwiegende Teil der Wuppertaler Oberböden hatte Ende der 1980er Jahre pH-Werte von unter 3. Dies führte in den extrem versauerten Bodenschichten zum Absterben fast aller Feinwurzeln, die dünner als zwei Zentimeter waren. Naturverjüngung aus Pflanzenkeimlingen gab es auf den extrem versauerten Schiefergebirgslehmen in dieser Zeit gar nicht mehr, weil die auskeimenden Wurzeln im Oberboden sofort abstarben. Nach den Stürmen „Vivian“ und „Wiebke“ im Jahr 1990 wurde an den Wurzeltellern umgestürzter Bäume sichtbar, dass die Wurzelstöcke der Bäume sehr stark geschädigt waren, nahezu keine Feinwurzeln mehr hatten, die Bäume nicht mehr standfest waren und kaum noch Pflanzennährstoffe aufnehmen konnten.

2 Bodenschutzkalkungen in der Stadt Wuppertal

Seit dem Jahr 1984 wurden in den sehr stark vom „Sauren Regen“ geschädigten Stadt- und FBG-Wäldern regelmäßig Bodenschutzkalkungen mit 3 Tonnen magnesiumhaltigen Kalksteinmehls pro Hektar durchgeführt. Mit dem (nicht gebrannten!) Gestein aus Kalksteinbrüchen, das im Gegensatz zum Kunstdünger nur sehr langsam (im Laufe von mehreren Jahren) zersetzt wird, sollte der fortschreitenden Bodenversauerung entgegengewirkt und die Vitalität der Waldbestände erhalten werden. Rund 75% der Waldflächen wurden seitdem mindestens einmal gekalkt. In vielen Wäldern wurden nach jeweils einem Jahrzehnt Wiederholungskalkungen durchgeführt. Teile der Privat- und Stadtwälder konnten nicht mit einem Hubschrauber gekalkt werden, weil sie extrem zerstückelt und zersiedelt sind und zu nah an einer Bebauung liegen.

Um die Effizienz und die Wirkungen dieser aufwendigen Maßnahmen zu kontrollieren, wurde das bodenökologische Institut der Ruhr-Universität Bochum in den Jahren 2000 und 2015 durch das Umweltressort beauftragt, die Kalkwirkungen zu untersuchen und ob, in welcher Form und in welchen zeitlichen Abständen diese Kalkungen fortgeführt werden sollen. Darüber hinaus sollte geprüft werden, inwieweit die Humusvorräte von den Kalkungen betroffen sind, da es durch Anhebung des pH-Wertes zu einer erhöhten biologischen Mineralisierungsaktivität kommen kann. Die Untersuchungen wurden daher durch Humusvorratsbestimmungen und durch Laborversuche zur biologischen Aktivität ergänzt.

Bodenschutz- oder Kompensationskalkungen, wie sie seit Jahren bundesweit in den Waldgebieten durchgeführt werden, haben zum Ziel, eine weitere Bodenversauerung zu verhindern und den Nährstoffkreislauf in den Böden wieder herzustellen, damit die Bäume ausreichend mit Nährstoffen versorgt werden. Zur Beurteilung der Wirksamkeit dieser Maßnahmen eignet sich am besten neben der Bestimmung des pH-Wertes die relativ einfache Bestimmung der Säureneutralisationskapazität der

Böden. Darüber hinaus kann über die Quantifizierung der Vorräte an austauschbaren Kationen ermittelt werden, ob es zu einer nachhaltigen Erhöhung dieser Nährstoffe im Boden gekommen ist, oder ob sie rasch wieder ausgewaschen wurden.

Auf Grund der pH-Wert-Erhöhung auf den gekalkten Waldflächen sollten dort wieder Regenwürmer und Humus zersetzende Mikroben in den ehemals extrem versauerten Wuppertaler Waldböden besser überleben können. Dies würde zu einer vermehrten Freisetzung organisch gebundener Nährstoffe wie P und N führen, die dann von den Pflanzen aufgenommen werden können. Die erhöhte biologische Aktivität kann anhand erhöhter Atmungsraten (CO₂-Freisetzung) nachweisen werden. Übersteigt die Freisetzungsrates allerdings den Pflanzenbedarf, besteht vor allem beim Stickstoff die Gefahr, dass dieser vermehrt als Nitrat ausgewaschen wird und damit zu einem Problem im Grund- und Oberflächenwasser werden kann. Bei den in Wäldern praxisüblichen Kalkmengen (3 t/ha) sind erfahrungsgemäß keine starke Humusverluste und Nitratauswaschungen zu erwarten.

3 Ergebnisse und Diskussion

Um die Wirkungen der Waldkalkungsmaßnahmen bewerten zu können, wurden die Böden von gekalkten und nicht gekalkten Wäldern auf Dauerbeobachtungsflächen der Waldschadenserhebungen (= DBF) untersucht.

Tab. 3: Ausgewählte Dauerbeobachtungsflächen.

DBF	Neigung in Grad	Boden- typ ¹	Boden- art	Baumart	Pflanz- jahr	Jahr der Kalkung
84	23	p2BBn	sandiger Lehm	Buche	1954	---- Nov.2014
79	25	p2BBn	sandiger Lehm	Buche	1954	1993, 2006
32	17	BBn (LaWi)	schluffiger Lehm	Buche	1969	----
17	20	p2BBn	schluffiger Lehm	Buche	1963	1992,1999, Okt. 2015
33	15	p2BBn	schluffiger Lehm	Fichte	1956	----
110	9	BBn	schluffiger Lehm	Fichte	1946	1992, 2013
24	13	p2BBn	schluffiger Lehm	Bu/Eiche	1866	----
29	12	p2BBn	schluffiger Lehm	Bu/Eiche	1846	1989,Okt.2015
37	14	p3BBn	schluffiger Lehm	Bu/Eiche	1856	1985,1992,2013

¹ BBn: normale Braunerde; p2BBn: schwach podsolige Braunerde; p3BBn: mäßig podsolige Braunerde

3.1 pH-Werte

Für die Probenahmejahre 1990, 2000 und 2015 wurden die pH-Werte der gleichen Tiefenstufen verglichen (s. Tab. 2). Die Probenahme im Jahr 2015 erfolgte am Anfang des Jahres – also vor der Kalkung im Herbst 2015.

Tab. 4: pH-Werte der untersuchten Dauerbeobachtungsflächen (DBF)

DBF	Waldgebiet	Baum-art ³	Pflanz-jahr	Kalkung	pH-Werte Ofh		pH-Werte 0-5 cm			pH-Werte 5-10 cm			pH-Werte 10-15 cm		
					2000	2015	1990	2000	2015	1990	2000	2015	1990	2000	2015
84	Langerfelder Anlagen	Bu	1954	Nov.2014	3,09	4,22	2,69	2,70	2,81	2,66	2,87	2,84	2,95	3,13	3,13
79	Murmeltal	Bu	1954	1993, 2006	3,97	4,39	2,90	3,19	3,75	2,98	3,21	3,59	3,63	3,53	3,76
32	Mastweg	Bu	1969	----	3,61	3,40	3,62	3,57	3,49	3,88	3,82	3,66	4,17	4,20	4,15
17	Wüstholz	Bu	1963	1992,1999, Okt.2015	6,72	5,25	2,78	4,13	4,79	3,00	3,40	4,08	3,86	3,73	3,93
33	Mastweg	Fi	1956	----	3,01	3,15	2,78	2,79	2,95	3,15	3,09	3,15	3,88	3,79	3,54
34	Zillertal	Fi	1928	1992, 2013	4,52		2,65		2,97	2,85		2,97	3,52		3,17
24	Morsbacher Berg	Bu/Ei	1866	----	3,79	3,09	2,87	2,95	3,02	3,17	3,10	3,18	3,48	3,67	4,07
29	Pflegeheimstraße	Bu/Ei	1846	1989, Okt.2015	3,79	3,15	3,18	3,21	3,29	3,42	3,15	3,38	3,79	3,85	3,84
37	Talsperrenwald	Bu/Ei	1856	1985,1992, 2013	3,93	3,88	2,89	3,18	3,15	3,17	3,17	3,11	3,64	3,66	3,37

- Silikatpuffer: Wirksamkeit zwischen pH 5,0 – 6,2; optimaler Bereich für das Wachstum der Waldbäume

- Austauscherpuffer: vor allem im Bereich von ca. pH 4,2 – 5,0 wirksam

- Al-Pufferbereich: wirksam zwischen pH 3– 4,2; pflanzengiftiges Aluminium wird frei und verursacht Pflanzenschäden

- Fe-Pufferbereich: pH < 3; giftiges Eisen wird frei, wird von den Pflanzenwurzeln aufgenommen und verursacht das Absterben von Wurzeln

Vor Beginn der Waldkalkungen wiesen – außer auf Kalkverwitterungs- und Lössböden in den nördlichen Wäldern Wuppertals – 90 Prozent der Böden pH-Werte unter 3,5 (~ sehr sauer bis extrem sauer) auf.

In der Humusaufgabe (Ofh: s. Tab. 4) zeigt sich der deutlichste Kalkungseffekt in der Dauerbeobachtungsfläche 17 (Wüstholz), die bereits 1999 zum zweiten Mal gekalkt wurde. Hier ist der Silikatpufferbereich erreicht, d. h. Aluminium- und Eisenionen sind so fixiert, so dass sie die Pflanzen nicht mehr schädigen können. Auch in den Bodenschichten 0-5 Zentimeter und 5-10 Zentimeter sind die erfolgten Kalkungsmaßnahmen noch nachweisbar. In den tieferen Bodenschichten ist die Kompensationskalkung aber noch nicht angekommen. Dies zeigt wie langsam diese Kalkungen mit Gesteinsmehl wirken. Auch bei den Dauerbeobachtungsflächen 84, 79 und 34 ist der pH-Wert in Folge der Kalkungen nicht mehr so extrem niedrig. Dagegen sind die Kalkungsmaßnahmen auf den DBF 29 und 37 nicht mehr nachweisbar.

Für die Tiefenstufe 0-5 cm lassen sich Kalkungseffekte auf den Flächen 79, 17 und 37 nachweisen. Der stärkste pH-Anstieg ist auf der Fläche 17 (Wüstholz) zu verzeichnen, die schon 1999 zum zweiten Mal gekalkt wurde und wo in der Humusaufgabe bei der Probenahme noch freie Kalkreste erkennbar waren. Auf den Flächen 37 und 79 liegen die Kalkungen acht bzw. neun Jahre zurück, dennoch sind die pH-Werte noch um knapp eine halbe Einheit erhöht. Die bereits 1989 gekalkte Fläche 29 (Pflegeheimstraße) wies zum Zeitpunkt der Probenahme einen abgesunkenen pH-Wert auf, inzwischen dürfte dieser Wert aufgrund der im Herbst 2015 erfolgten Kalkung aber wieder höher sein.

In 5-10 cm Tiefe sind nur noch auf den Flächen 79 (Murmeltal) und 17 (Wüstholz) Kalkungseffekte erkennbar, in der folgenden Tiefenstufe gar keine mehr.

In der Tiefenstufe 10-30 cm fällt auf, dass die Fläche 84 (Langerfelder Anlagen) den niedrigsten pH-Wert (aktuell: 3,13) aufweist. Dies ist damit zu erklären, dass dort – wegen der sehr bebauungsnahen Lage - erstmals im November 2014 die erste Hubschrauber-Kalkung durchgeführt wurde. Bis zu diesem Zeitpunkt haben die sauren Niederschläge immer wieder neue Versauerungsschübe ausgelöst,

was zur Folge hatte, dass es an diesem Standort keine Naturverjüngung, Gräser oder Kräuter gibt, weil die Keimlingswurzeln in dem sehr sauren Bodenmilieu durch Aluminiumionen zerstört werden. Nach der jüngst erfolgten Kalkung ist nun im Auflagehorizont bereits die Anhebung des pH-Wertes nachweisbar.

3.2 Säureneutralisationskapazität (SNK)

Die Säureneutralisationskapazität zeigt, wie groß die Säuremengen sein müssen, um den pH-Wert bis auf 3,0 abzusenken. Im Mineralboden nimmt die Pufferkapazität in der Regel mit der Bodentiefe zu, da der Unterboden durch „Sauren Regen“ weniger versauert ist. Die obersten Bodenschichten ungekalkter Böden sind in Wuppertal oft so stark versauert und an Calcium und anderen Nährstoffen verarmt, dass schon geringe Mengen an sauren Niederschlägen zu einem starken weiteren Absinken der pH-Werte führen.

Wenn man die oberen Horizonte ungekalkter und gekalkter Standorte vergleicht, lassen sich auf den gekalkten Standorten deutlich erhöhte Pufferkapazitäten (~ Pflanzennährstoffreserven) und somit eine Kalkwirkung nachweisen.

Während die meisten Böden in den obersten 10 cm SNK-Werte unter 4.000 mmolc m² aufweisen, fallen die beiden Buchenstandorte 32 und 17 durch drei- bis vierfach höhere Werte auf. Auf dem Standort 17 (Wüstholz) lässt sich dies zum Teil auf die erst kürzlich erfolgte zweite Kalkung zurückführen, da sich hier allein im Auflagehorizont bereits ein SNK-Vorrat von über 3.400 mmolc/m² befindet.

Tab. 5: SNK-Werte (in mmolc/m²) der untersuchten Dauerbeobachtungsflächen (Jahr 2015)

DBF	Waldgebiet	Baum-art ³	Pflanz-jahr	Kalkung	SNK-Werte 2015 Ofh	SNK-Werte 2015 0-5 cm	SNK-Werte 2015 5-10 cm	SNK-Werte 2015 10-30 cm
84	Langerfelder Anlagen	Bu	1954	Nov.2014	3.470	0	0	0
79	Murmeltal	Bu	1954	1993, 2006	457	1708	2584	11760
32	Mastweg	Bu	1969	----	431	1568	2904	27120
17	Wüstholz	Bu	1963	1992,1999, Okt.2015	2994	7165	4599	9600
33	Mastweg	Fi	1956	----	299	0	0	5520
34	Zillertal	Fi	1928	1992, 2013	2343	588	0	720
24	Morsbacher Berg	Bu/Ei	1866	----	156	185	0	21840
29	Pflegeheim straße	Bu/Ei	1846	1989,Okt.2015	319	583	414	8400
37	Talsperrenwald	Bu/Ei	1856	1985,1992, 2013	1125	342	0	3360

Der Boden des ungekalkten Standorts 32 (Mastweg) weist die höchste SNK der hier untersuchten Flächen auf, was in engem Zusammenhang mit den ebenfalls relativ hohen pH-Werten steht (vgl. Abb. 2). Dies lässt sich dadurch erklären, dass diese Fläche vor der Aufforstung mit Buchen 1969 un-

ter landwirtschaftlicher Nutzung stand (Staack 1992) und damit sicherlich regelmäßig gekalkt und/oder mit basischen Nährstoffen gedüngt wurde.

Lediglich der 1993 gekalkte Standort 79 (Murmeltal) weist eine gegenüber dem Vergleichsstandort 84 deutlich höhere SNK in allen drei Tiefenstufen auf. Bei der Gruppe der über 100-jährigen Buchen/Eichenbestände (24, 37, 29) fällt auf, dass die SNK des bereits zweimal gekalkten Standorts 37 geringer ist, als die des nur einmalig 1989 gekalkten Standorts 29, wobei der Unterschied vor allem durch die erhöhten Werte in 5-10 cm Tiefe zustande kommt.

Es ist zu vermerken, dass mit Ausnahme der beiden Standorte 32 und 17 die SNK-Vorräte aller Flächen deutlich unter den Werten von 6.000 mmolc/m^2 liegen, die theoretisch mit einer Kalkung in Höhe von 3 t/ha zugeführt werden. Dies macht zum Einen deutlich, wie gering die Pufferkapazitäten dieser Böden sind, zum Anderen aber auch, dass die SNK durch praxisübliche Kalkungen nur bis zu 5 Jahre erhöht werden kann.

Bezieht man auch die Tiefenstufe 10-30 cm in die Berechnungen mit ein, so erhöhen sich die SNK-Vorräte auf 10.000 bis 50.000 mmolc/m^2 (Tab. 5). Dies zeigt, dass in den größeren Bodentiefen zum Teil noch ein erheblicher Vorrat an Puffersubstanzen vorhanden ist, der ein weiteres rasches Absinken der pH-Werte unter 3 verhindert.

Bei geschätzten jährlichen Säureeinträgen von $100\text{-}300 \text{ mmolc/m}^2$ (vgl. Abb. 2) bestand auf manchen ungekalkten Flächen (Langerfelder Anlagen) kein Widerstand gegen rasch fortschreitende Tiefenversauerung mehr.

Zusammenfassend lässt sich bezüglich der SNK feststellen, dass es offensichtlich unter den herrschenden klimatischen Bedingungen und der lokalen Säureeintragssituation zur raschen Lösung und Auswaschung des zugeführten Kalks kommt, wonach maximale jährliche Kalklösungsraten von ca. 1 t/ha bei 1.000 mm Niederschlag auftreten. Werden starke Mineralsäuren (HNO_3 , H_2SO_4) mit den Niederschlägen zugeführt, so verhindert deren Neutralisation durch Kalk eine fortschreitende Bodenversauerung.

3.3 Austauschbare Basen

Die mit dem Kalk zugeführten basischen Kationen (Ca^{2+} und Mg^{2+}) werden bei der Lösung des Kalks freigesetzt und können entweder mit dem Sickerwasser ausgewaschen oder an Austauscherplätze gebunden werden. Letzteres kann zur Erhöhung der Pufferkapazität der Böden und zur verbesserten Nährstoffversorgung für die Vegetation beitragen.

Die austauschbaren Ca-Vorräte auf den Untersuchungsflächen liegen bis 30 cm Tiefe zwischen 600 und 6.000 mmolc/m^2 und erreichen damit nur in einem Fall die Ca-Menge, die mit einer praxisüblichen Kalkung mit reinem Calcit zugeführt wird (6.000 mmolc/m^2). Dies zeigt, dass der Großteil des bei der Kalklösung freigesetzten Ca in größere Bodentiefen oder bis ins Grundwasser und in die Vorfluter ausgewaschen wurde. Lediglich der Standort 17 zeichnet sich durch deutlich erhöhte Ca-Vorräte aus. Hier dürfte es sich allerdings zum Großteil um den noch erkennbaren ungelösten Kalk aus dem Jahr 1999 handeln.

Unter den anderen Kalkungsflächen weist lediglich die Fläche 79 gegenüber dem Standort 84 einen erhöhten Ca-Vorrat auf, der mit rund 2.400 mmolc/m^2 auf eine hohe Festlegung des zugeführten Ca im Oberboden hinweisen würde. Auf den beiden Kalkungsflächen 37 und 29 ist bei den Gesamt-Ca-Vorräten nur ein geringerer Unterschied gegenüber der ungekalkten Vergleichsfläche 24 feststellbar.

Allerdings deuten die relativ hohen Ca-Vorräte in 0-5 cm Tiefe darauf hin, dass es hier zu einer kalkbedingten Vorraterhöhung um 700-1.200 mmolc/m² gekommen ist. Wie schon bei der SNK sind hier die Kalkwirkungen in der einmalig gekalkten Fläche 29 stärker ausgeprägt als in der zweimalig gekalkten Fläche 37.

Auf fast allen Kalkungsflächen sind die Magnesium-Vorräte deutlich gegenüber den ungekalkten Vergleichsflächen erhöht. Dies deutet darauf hin, dass das im Dolomit enthaltene Mg in stärkerem Maße vor der Auswaschung geschützt ist.

Ein weiteres wichtiges Maß für die Abschätzung von Kalkwirkungen ist die Basensättigung, ausgedrückt als der prozentuale Anteil an austauschbaren Basen an der Kationenaustauschkapazität (KAK). In den Humusaufgaben liegen diese Werte trotz der meist extrem sauren pH-Werte von 3,0 bis 3,9 in der Regel bei über 60 %, da die organische Substanz eine sehr hohe Selektivität für Ca besitzt, und in diesem Horizont wenig Al³⁺ vorkommt oder organisch komplexiert wird und damit die zweiwertigen Kationen nicht verdrängen kann. Auf den gekalkten Standorten 79, 17, 37 und 29 erreichen die Basensättigungen fast 100% und belegen eine Kalkwirkung. Auch in 0-5 und in 5-10 cm Tiefe ist die Basensättigung der gekalkten Standorte gegenüber den ungekalkten Vergleichsflächen deutlich erhöht. In 10-30 cm Tiefe liegen die Basensättigungen vielfach unter 10%, da hier Al³⁺ vermehrt als freies Kation vorkommt und damit eine sehr hohe Affinität für die Austauschplätze hat. Eine Kalkwirkung ist hier möglicherweise am Standort 79 zu erkennen.

3.4 Kohlenstoffvorräte

Die Kohlenstoffgehalte und die daraus abgeleiteten Kohlenstoffvorräte wurden nur für die Humusaufgabe ermittelt, da eventuelle Kalkungseffekte wie Humusabbau oder Humusumverteilung bei den geringen Kalkgaben kaum in größeren Tiefen wirksam sein dürften. Auf den meisten Standorten liegen die Vorräte zwischen 3 und 5 kg C_{org}/m². Dies entspricht einem C_{org}-Vorrat von 30-50 t/ha. Nur am Standort 32 bestand die Humusaufgabe lediglich aus einer dünnen Schicht schwach zersetzter Buchenstreu (= Of) von gerade einmal 0,44 kg C_{org}/m², was sich damit erklären lässt, dass hier eine Humusakkumulation erst seit der Umwandlung aus Ackerland vor rund 35 Jahren stattfinden konnte und die relativ gute Nährstoffversorgung und höhere pH-Werte des Bodens eine hohe biologische Aktivität zulassen.

Die höchsten C_{org}-Vorräte weist der Standort 84 (Langerfelder Anlagen) auf, der sich auch durch die niedrigsten pH-Werte und die geringsten Ca- und Mg-Vorräte auszeichnet. Daraus resultiert eine sehr geringe biologische Abbauproduktivität im Boden. Dieser Standort hatte auch unter den 93 untersuchten Flächen von 1990 (Staack 1992) die höchsten Auflagehumusmengen und liegt im bundesweiten Vergleich der Auflagehumusvorräte im oberen Bereich.

Die Kalkflächen unterscheiden sich kaum von den jeweiligen ungekalkten Vergleichsflächen, so dass auch hier ein kalkungsbedingter Humusvorratsabbau nicht nachweisbar ist.

3.5 Schwermetalle

Die Waldböden in Wuppertal sind teilweise stark mit Schwermetallen belastet und liegen im Vergleich zu den durchschnittlichen Gehalten der Waldböden in NRW deutlich höher.

Die Arsengehalte (aus Steinkohleverbrennungsprozessen) liegen in den Oberböden (0 bis 10 cm) im Bereich von 20-40 mg/kg. In versauerten Böden unter pH 4,5 steigt die Löslichkeit und damit die

Pflanzenverfügbarkeit, was zu toxischer Wirkung auf Pflanzen und Mikroorganismen im Boden führen kann.

Die Cadmiumgehalte liegen in den Oberböden (0 bis 10 cm) im Bereich von 0,5-2,5 mg/kg. Mit zunehmender Tiefe steigen die Konzentrationen an, was durch die hohe Mobilität des Cadmiums bei geringen pH-Werten zu erklären ist. Eine Kalkung führt zur festeren Bindung an den Boden, so dass das Cadmium nicht mehr ausgewaschen wird und nicht mehr pflanzenverfügbar ist.

Die Kupfergehalte liegen in den Oberböden (0 bis 10 cm) im Bereich von 10-60 mg/kg. Kupfer ist ein wichtiges Nährelement für Pflanzen und Tiere. Es kann aber als Schwermetall in großen Mengen (ab 60 mg/kg) toxisch wirken und führt dann zu reduziertem Wurzelwachstum. Mit einer Kalkung wird mittelfristig dafür gesorgt, dass das Kupfer im Boden besser gebunden und damit unschädlich für die Pflanzen wird.

Die Blei- und Bleigehalte liegen in den Oberböden (0 bis 10 cm) im Bereich von 200-400 mg/kg. Unterhalb von pH 4 wird Blei gelöst und damit ist pflanzenverfügbar. Hohe mobile Blei- und Bleigehalte können toxisch auf Mikroorganismen wirken. Zu erwähnen ist noch, dass der Prüfwert für Spielflächen aus dem Bodenschutzrecht bei 200 mg/kg liegt, so dass bei der Errichtung von Waldspielflächen die Schadstoffbelastung der Böden zu prüfen ist.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aus den Untersuchungsergebnissen der Universität Bochum lassen sich folgende für die Praxis relevante Aussagen ableiten:

- Seit dem Jahr 1990 ist die Bodenversauerung in den Wuppertaler Wäldern nicht weiter vorangeschritten. Dies liegt neben dem zugeführten Kalk auch daran, dass die Emissionen des Hauptsäurebildners SO_2 zwischen 1990 und 2010 bundesweit um rund 90 % zurückgegangen sind. Die Stickoxidemissionen wurden halbiert, aber die Säureeinträge aus den NO_x - und NH_4 -Verbindungen (Quellen: Fahrzeugverkehr und Viehhaltung) liegen noch auf einem relativ hohen Niveau. Die verringerten Säureeinträge führen zu einem Rückgang von Bodenversauerungsprozessen.
- Deutliche pH-Erhöhungen im Boden sind nur auf relativ frisch gekalkten Standorten (z.B. DBF 17) nachweisbar. Standorte mit länger zurückliegenden Kalkungen zeigen nur noch schwach erhöhte pH-Werte (maximal 0,5 Einheiten) im Auflagehumus. Der zugeführte Kalk sorgt für eine erste Neutralisation der vorhandenen freien Säuren sowie Bindung von toxischen Stoffen. Zukünftige Säureeinträge können für einige wenige Jahre neutralisiert werden. Somit wird das Ökosystem ein wenig stabilisiert; d. h. Kompensationskalkungen mit 3 t Kalk pro ha führen nicht zu längerfristigen pH-Erhöhungen im Boden und müssen für eine nachhaltige Erhöhung regelmäßig wiederholt werden.
- Ähnliches gilt für die Säureneutralisationskapazität. Entgegen den Erwartungen lagen die SNK-Vorräte bis 10 cm Tiefe mit wenigen Ausnahmen weit unter den $6.000 \text{ mmolc m}^{-2}$, die mit einer praxisüblichen Kalkung zugeführt werden. Eine erhöhte Säureneutralisationskapazität wird nachhaltig nur langfristig mit einer wiederholten Kalkung zu erzielen sein.
- Ein wichtiger Kalkungseffekt dürfte insbesondere die Erhöhung der austauschbaren Magnesium-Vorräte im Oberboden sein, was auf die Verwendung dolomitreicher Kalke zurückzuführen ist. Magnesium spielt als Bestandteil des Chlorophylls eine wichtige Rolle bei der Vitalität von Bäu-

men und lag 1990 bei den Blatt- und Nadelanalysen von den Wuppertaler Dauerbeobachtungsflächen fast durchweg im Mangelbereich (Staack 1992). Auch die Bodenlebewesen profitieren offensichtlich von dieser Magnesium-Zufuhr, da die Atmungsaktivität eng mit dem austauschbaren Magnesium korrelierte.

- Trotz der stimulierten biologischen Aktivität ließen sich keine negative Auswirkungen auf die Humusvorräte der Standorte nachweisen. Bis auf die ehemals landwirtschaftlich genutzte Fläche 32 sind die Humusvorräte an allen Standorten hoch bis sehr hoch. Eine zu starke Mineralisation mit bedenklichen Vorratsverlusten und eine Nitratauswaschung wurden nicht festgestellt.

Schlussfolgerungen

1. Wie schon 1990 festgestellt wurde, sind die Böden in den Wuppertaler Wäldern größtenteils sehr sauer. Durch Kompensationskalkungen mit 3 Tonnen magnesiumhaltigen Kalkgesteins pro Hektar können pH-Wert oder SNK nur für einige Jahre angehoben werden. Erst Wiederholungskalkungen – im 10 Jahres-Turnus – sorgen für eine nachhaltige Verbesserung im Ökosystem Boden (bessere Nährstoffversorgung; Verringerung der pflanzengiftigen Aluminium-Ionen in der Bodennährflösung).
2. Um die 1990 festgestellte Nährstoffmangelsituation der Bäume zu beheben, könnten – nach Nährelementanalysen in Blättern - gezielte Düngungen mit Magnesium- und Kalium-Salzen die Gesundheit der Bäume verbessern. Die vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass es allein durch die Magnesium-Zufuhr mit den bei der Kalkung verwendeten dolomitischen Kalken zu einer Stimulierung der biologischen Aktivität kommt und auf diese Weise zusätzlich organisch gebundene Nährstoffreserven (insbesondere Phosphor) mobilisiert würden. Dies verbessert die Vitalität der Waldbäume. Auf eine zusätzliche Düngung kann zunächst verzichtet werden.

5 Literatur

- Bundesanstalt für Geowissenschaften (BGR), 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 5. Auflage.
- Czakov, K. 2015: Bodenkundliche Untersuchungen zur Effizienzkontrolle von Waldkalkungen im Stadtgebiet von Wuppertal – Masterarbeit.
- Gierse, R.; Bang, M. 1993: Umweltschutz in Wuppertal, Bodenbericht.
- Marschner, B.; Gensior, A.; Fischer, U. 1998. Response of soil solution chemistry to recent declines in atmospheric deposition in two forest ecosystems in Berlin, Germany. *Geoderma* 83, 83-101.
- Marschner, B. 2001: Bodenkundliche Untersuchungen zur Effizienzkontrolle von Waldkalkungen im Stadtgebiet von Wuppertal. Abschlussbericht Universität Bochum.
- Staack, J., 1992. Maßnahmenprogramm der Stadt Wuppertal zur Verringerung der neuartigen Waldschäden. Gutachten im Auftrag der Stadt Wuppertal.
- Ulrich, B., 1981. Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde*. 144, 289-305.
- Vosteen, A. (2011): Waldzustand in Wuppertal 2011. (Bericht).