



Ermittlung des Standes des Wissens
hinsichtlich der Bewertung von Auswirkungen
störfallbedingter Freisetzungen auf unter dem
Gesichtspunkt des Naturschutzes besonders
wertvolle bzw. besonders empfindliche Gebiete
- *Literatur- und Datenbankrecherche* -

Auftraggeber: Landesamt für Natur, Umwelt- und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen Recklinghausen

bearbeitet von PD Dr. Ing. habil Angela Schlutow
unter Mitarbeit von Dr. sc. Hans-Dieter Nagel und
Sebastian Ossenkop

März 2016

Inhalt

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Aufgabenstellung | 3 |
| 2 | Phyto- und ökotoxische Wirkungen von Luftschadstoffen..... | 4 |
| 2.1 | Ammoniak (NH ₃)..... | 4 |
| 2.2 | Schwefeldioxid (SO ₂)..... | 5 |
| 2.3 | Schwefelwasserstoff (H ₂ S)..... | 6 |
| 2.4 | Chlor (Cl) | 7 |
| 2.5 | Chlorwasserstoff (HCl) | 7 |
| 2.6 | Formaldehyd (CH ₂ O)..... | 8 |
| 2.7 | Fluor | 8 |
| 2.8 | Fluorwasserstoff (HF) | 9 |
| 3 | Spezifische Empfindlichkeit der charakteristischen Pflanzenarten ausgewählter FFH-Lebensraumtypen | 10 |
| 3.1 | <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Carex pilulifera</i> (Hainsimsen-Buchenwald) | 10 |
| 3.2 | <i>Arrhenatherum elatius</i> , <i>Knautia arvensis</i> , <i>Tragopogon pratensis</i> (Artenreiche Wiesen) | 12 |
| 3.3 | <i>Carex nigra</i> , <i>Ranunculus flammula</i> (Bodensaure Flachmoore)..... | 12 |
| 3.4 | <i>Chara spec.</i> (Oligotrophe bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer)..... | 13 |
| 3.5 | <i>Calluna vulgaris</i> , <i>Molinia caerulea</i> (Trockene Heiden)..... | 14 |
| 4 | Critical Levels für Einträge gasförmiger Schadstoffe..... | 15 |
| 4.1 | Datengrundlagen | 15 |
| 4.2 | Critical Levels für <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Carex pilulifera</i> (Hainsimsen-Buchenwald)..... | 17 |
| 4.3 | Critical Levels für <i>Arrhenatherum elatius</i> , <i>Knautia arvensis</i> , <i>Tragopogon pratensis</i> (Artenreiche Wiesen) | 18 |
| 4.4 | Critical Levels für <i>Carex nigra</i> , <i>Ranunculus flammula</i> (Bodensaure Flachmoore) .. | 19 |
| 4.5 | Critical Levels für <i>Chara spec.</i> (Oligotrophe bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer) 20 | |
| 4.6 | Critical Levels für <i>Calluna vulgaris</i> , <i>Molinia caerulea</i> (Trockene Heiden) | 20 |
| 5 | Zusammenfassung | 23 |

1 Aufgabenstellung

Die Europäische Seveso-III-Richtlinie sieht vor, dass unter dem Gesichtspunkt des Naturschutzes besonders wertvolle bzw. besonders empfindliche Gebiete in der Nachbarschaft von Betrieben erforderlichenfalls durch angemessene Sicherheitsabstände oder durch andere relevante Maßnahmen geschützt werden. Für die Bewertung phytotoxischer Expositionen sind geeignete Beurteilungswerte bzw. -kriterien derzeit nicht bekannt.

Im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens wird der Stand des Wissens in dieser Thematik ermittelt. Der Untersuchungsumfang wird auf die Auswirkung störfallrelevanter Stofffreisetzungen auf in naturschutzfachlich wertvollen oder empfindlichen Gebieten angesiedelte Pflanzen eingeschränkt. Da davon ausgegangen wird, dass flüssige gefährliche Stoffe durch passive Auffangsysteme sicher zurückgehalten werden können, werden hier ausschließlich gefährliche Gase betrachtet.

Der Auftraggeber hat zu betrachtende **Lebensraumtypen, Pflanzenarten und gefährliche Stoffe** vorgeben:

Zu untersuchende **Lebensraumtypen** sind:

- Hainsimsen-Buchenwald
- Artenreiche Wiesen
- Bodensaure Flachmoore
- Oligotrophe bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer
- Trockene Heiden.

Zu betrachtende **gefährliche Gase** sind:

- Chlor,
- Chlorwasserstoff,
- Schwefeldioxid,
- Schwefelwasserstoff,
- Formaldehyd,
- Ammoniak,
- Fluorwasserstoff und
- Fluor.

Daraus ergeben sich folgende Arbeitsaufgaben und Zielstellungen, die in diesem Projekt erbracht werden:

Arbeitspaket 1: Literatur- und Datenbankrecherche

Es wird eine Literatur- und Datenbankrecherche durchgeführt, mit deren Hilfe die folgende Fragen beantwortet werden:

- a. Welche dokumentierten Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen einer kurzzeitigen Exposition der genannten Lebensraumtypen gegenüber den genannten Stoffen gibt es?
- b. Welche ökotoxikologischen Beurteilungswerte sind dort abgeleitet worden bzw. können aus den Untersuchungen abgeleitet werden?

Arbeitspaket 2: Zuordnung der Ergebnisse zu Lebensraumtypen und Pflanzenarten

Die Recherche wird sich auf die o.g. genannten Lebensraumtypen beschränken und dort insbesondere folgende **Pflanzen** abdecken:

- a. Buche (*Fagus sylvatica*), *Maianthemum bifolium*, *Carex pilulifera* (Hainsimsen-Buchenwald)
- b. *Arrhenatherum elatius*, *Knautia arvensis*, *Tragopogon pratensis* (Artenreiche Wiesen)
- c. *Carex nigra*, *Ranunculus flammula* (Bodensaure Flachmoore)
- d. *Chara spec.* (Oligotrophe bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer)
- e. *Calluna vulgaris*, *Molinia caerulea* (Trockene Heiden).

Arbeitspaket 3: Analyse ausgewählter Datenbanken

Bei der Recherche werden die folgenden Datenbanken berücksichtigt:

Biological Abstracts, BIOSIS, Chemical Abstract Datenbanken, ChemIDplus, HSDB und Toxline sowie ECOTOX (US EPA) und ETOX (UBA), Web of Knowledge. Der Suchzeitraum umfasst vorrangig die Literatur ab 1985.

Arbeitspaket 4: Zusammenfassung der Ergebnisse, Dokumentation der Literaturrecherche

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse zusammengefasst.

2 Phyto- und ökotoxische Wirkungen von Luftschadstoffen

2.1 Ammoniak (NH₃)

Eine ausführliche Beschreibung der Wirkungen von NH₃ gibt Smidt (2010, 2013) wie folgt: Die Assimilation bzw. Akkumulation von NH₃ geschieht überwiegend über oberirdische Organe. Ob vom Blatt aufgenommenes Ammoniak primär düngend und damit wachstumsfördernd oder toxisch wirkt, hängt davon ab, ob die Assimilationsrate mit der Aufnahmerate Schritt hält oder nicht. Für die Assimilation und „Entgiftung“ des Ammoniaks wird ein ausreichendes Angebot an Kohlenstoff und Energieäquivalenten benötigt, das durch die Photosynthese bereitgestellt werden muss. Sobald die NH₃-Aufnahme die Assimilationskapazität überschreitet, wird NH₄⁺ akkumuliert, und es treten toxische Effekte wie eine Entkoppelung der Photophosphorylierung oder die Verätzung der Gewebe aufgrund der alkalischen Wirkung auf, die binnen kurzer Zeit zum Zelltod führen können. Eine deutliche Überschreitung der Assimilationskapazität dürfte aber nur bei akuten Konzentrationsspitzen von Bedeutung sein.

Die Einwirkung hoher NH₃- Konzentrationen kann aber auch bereits nach wenigen Tagen zu Schädigungen führen. Sowohl im Blatt als auch nach der Aufnahme über die Wurzeln werden Ammoniumionen in Pflanzen rasch metabolisiert. Dabei wird der Stickstoff des Ammoniaks in Aminosäuren umgewandelt und trägt somit zur Proteinsynthese bei, wobei Protonen freigesetzt werden, die zu einer Absenkung des pH-Wertes in der Zelle führen. Pflanzenarten, die N bevorzugt als NH₃ aufnehmen, wie Nadelgehölze, Ericaceen und einige Laubbaumarten, weisen nur eine geringe physiologische Nitratassimilationskapazität auf, so dass sie nur ein geringes Protonen-Puffervermögen haben. Ruderale und einjährige Arten, aber auch Gräser und Pioniergehölze, die bevorzugt Nitrat aufnehmen, können dagegen ein hohes Puffervermögen den Protonen zur Neutralisation entgegensetzen (Soares et al. 1995 in Guderian 2001, Bd. 2B, S. 34).

Solange die NH_4^+ -Assimilationskapazität der Blätter nicht überschritten wird, führt die durch NH_3 - Zufuhr stimulierte erhöhte Assimilation auch zu einer erhöhten Transpiration und bei begrenzter nutzbarer Wasserkapazität des Bodens schnell zu Dürrestress (Van der Eerden u. Pérez-Soba 1992).

Wird die NH_4^+ -Assimilationskapazität der Blätter jedoch überschritten, kommt es zu Zelltod und Blattschädigungen. Die Schädigungsschwelle, bei der die Wachstumsstimulation in Wachstumsdepression umschlägt, hängt vor allem von der genetisch bedingten Assimilationskapazität der Pflanzenart ab, aber auch von den sonstigen Umweltfaktoren und dem Angebot an basischen Nährkationen.

Verminderte Frosthärte, nachlassender Widerstand gegen biogene Schädigungen und Rückgang der Mykorrhiza treten dagegen erst bei längerer Einwirkzeit über mindestens 9 Monate auf (Fangmeier et al. 1994).

Wirkungen kurzzeitig sehr hoher Ammoniak-Konzentrationen auf Pflanzen (nach Smidt 2010) sind:

- Erosion der kristallinen Wachsstrukturen der Blatt-/Nadeloberflächen
- Ättschäden an Blättern; braunrote bis schwarze interkostale Flecken, die durch Ausfällen von Gerbstoffen an der Epidermis und an Mesophyllzellen, beginnend vom Blattrand / von der Blattspitze, entstehen
- Störung des Wasserhaushaltes, Welken.

Die Reihung der Koniferen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber kurzzeitig hohen Expositionen ist eine deutlich andere als gegenüber chronischen NH_3 -Belastungen. So sind diese gegenüber Kurzzeit-Belastungen deutlich resistenter als gegenüber längeren Einwirkungen (Temple et al. 1979 in Fangmeier et al. 1994).

2.2 Schwefeldioxid (SO_2)

Schwefel ist ein essentieller Makronährstoff für Pflanzen. Jedoch ist der Bedarf an Schwefel als Bestandteil der Proteine sehr gering. Da stärker proteinhaltige krautige Pflanzen demzufolge einen höheren Bedarf an S (je kg Trockensubstanz) haben als z.B. Bäume, sind sie daher auch weniger empfindlich gegenüber zu hohen SO_2 -Einträgen (Elstner u. Hippeli in Hock u. Elstner 1995, S. 96).

SO_2 hat eine atmosphärische Verweildauer von durchschnittlich nur einem Tag (Irwin u. Williams 1988). Die Ausbreitung erfolgt jedoch rasch und weit. Trifft SO_2 auf die Blattoberfläche auf, insbesondere bei feuchten Blattoberflächen, werden die epicuticuläre Wachsschicht und damit die Permeabilität (Durchlässigkeit) beeinflusst, wodurch die Alterung der Blätter und Nadeln beschleunigt wird (Ziegler in Hock u. Elstner 1995, S. 55; Uhlig 1996). Wassertropfen auf der Cuticula reagieren mit dem SO_2 sofort zu Schwefelsäure (H_2SO_4), die die Wachsschicht angreift und Nekrosen verursacht (Legge u. Kupa 2002).

Erst nach Diffusion durch die Cuticula kann Schwefel in den Stoffwechsel eingeschleust und zu zelleigenen Komponenten umgewandelt werden. Wird ein bestimmter Schwellenwert überschritten (vgl. Kap. 4 und Anhang 1), treten zunächst unsichtbare und reversible

("physiologische") Schädigungen auf, z. B. eine Beeinträchtigung der Photosynthese. Wird die Dosierung erhöht, treten akute (sichtbare) Schäden in Form von Chlorophyllbleichung auf, die irreversibel sind (Elstner u. Hippeli in Hock u. Elstner 1995, S. 86). Kurzzeitige und letale Konzentrationsspitzen führen hingegen zu keiner Akkumulation, da das Blattorgan schnell abstirbt (Hippeli u. Elstner 1996, Smidt 2010).

Gasförmiges SO_2 gelangt durch die Stomata in den Interzellularraum, wo es im Kontakt mit dem apoplastischen Wasserfilm zu Bisulfit (HSO_3^-) bei niedrigem pH-Wert oder zu Sulfit (SO_3^-) bei höherem pH-Wert gelöst wird. Sulfit wirkt als Zellgift. Die katalytische Funktionsfähigkeit von Enzymproteinen wird gestört, was zu einer Minderung der Photosynthese führt (Anderson et al. 1988). Gleichzeitig wird der pH-Wert in den Stomata herabgesetzt, da bei der Lösung in Sulfite ein H^+ -Ion frei wird, was eine Versauerung bedingt. Die zur Kompensation benötigten basischen Kationen stehen der Ernährung der Pflanze nicht mehr zur Verfügung, so dass Mangelercheinungen auftreten.

Der größte Anteil der aus SO_2 entstandenen Schwefelverbindungen wird in den Zellen rasch zu Sulfat umgewandelt (Herschbach et al. 1995). Die Lichteinwirkung führt dabei gleichzeitig zur Bildung freier Radikale (Van Camp et al. 1994), wodurch Schädigungen hervorgerufen werden können, wenn das antioxidative Potenzial der Chloroplasten überschritten wird. Akute SO_2 -Schäden beruhen daher auf der Radikalbildung bei Überlastung der Entgiftungskapazität neben den Versauerungseffekten. Sichtbare Symptome sind gelbe bis braune Flecken-, Rand- und Spitzennekrosen an Laubblättern sowie Spitzennekrosen an Koniferennadeln bei hohen Konzentrationen. Somit ist die Schadwirkung kurzfristig akut wirkender hoher SO_2 -Konzentrationen im Sommerhalbjahr bei höheren Temperaturen und intensiverer Sonneneinstrahlung und gleichzeitig höherer physiologischer Aktivität der Pflanzen stärker als im Winterhalbjahr (Guderian 1977). Der Schädigungsgrad der Blätter ist nicht linear korreliert mit dem Produkt aus Konzentration und Einwirkzeit, sondern steigt mit zunehmender Konzentration progressiv an (Van Haut u. Stratmann 1969). SO_2 führt bei hohen Konzentrationen zu einem Stomataschluss. Dementsprechend wird die Transpiration beeinflusst (Smidt 2010).

2.3 Schwefelwasserstoff (H_2S)

H_2S ist in wässriger Lösung eine sehr schwache zweibasige Säure und wird in Gegenwart von Licht und Sauerstoff zu Schwefel oxidiert. Das heißt, es kommt nur in sauerstofffreier Umgebung vor, z. B. am Grund von Seen, wenn dort aus verschiedenen Gründen Sauerstoffmangel herrscht. Kommt H_2S mit Sauerstoff in Berührung, beträgt seine Verweilzeit in der Atmosphäre 1/2 bis 2 (4) Tage (Smidt 2010). In der Atmosphäre wird H_2S z. B. durch OH^+ , Sauerstoff und HO_2^+ zu SO_2 oxidiert, welches weiter zum Sulfat reagieren kann.

Die Aufnahme von H_2S über Blätter drängt die Sulfat-Aufnahme über die Wurzel zurück. Bei Schwefelmangel kann über die Stomata aufgenommener H_2S -Schwefel Mangelercheinungen aufheben. In geringen Konzentrationen kann H_2S deshalb das Wachstum stimulieren. Als Form der Nährstoffzufuhr hat H_2S jedoch keine Bedeutung, weil die hierfür erforderlichen Konzentrationen von zirka 200 ppb in der Regel nicht erreicht werden und schon ziemlich nahe an der Toxizitätsschwelle liegen.

Nach Einwirkung hoher Konzentrationen von SO_2 oder von Sulfit wird aber auch in geringem Umfang H_2S gebildet und aus den Blättern emittiert, sobald die Außenkonzentration niedriger ist als jene in der Atemhöhle (Smidt 2013). H_2S wird über die Stomata aufgenommen. Die

Giftwirkung beruht zum Teil auf der Bindung essentieller Metalle. Wegen seiner Eigenschaft, Schwermetalle in wenig lösliche Sulfide zu verwandeln, hemmt H_2S die Assimilation und Atmung durch Bindung von Eisen. Die biologische Membran wird hauptsächlich in undissoziierter Form passiert, was im Zusammenhang mit der Toxizität von Bedeutung ist. Die Toxizität nimmt mit zunehmendem pH-Wert ab (Smidt 2010).

H_2S greift wie SO_2 Chlorophyll bzw. die Chloroplasten an. Infolge dessen werden die Photosynthese und das Wachstum verschiedener Pflanzen gehemmt (vgl. Kap. 4 und Anhang 1). Als unmittelbar sichtbare Symptome treten - ähnlich wie bei SO_2 - Blattnekrosen an Spitzen und Rändern sowie nekrotische Läsionen auf. Sichtbare Symptome einer toxischen Dosis sind z. B. fahlgelbe Flecken, metallischer Glanz, Nekrotisierung und Blattverfärbungen von der Blattspitze her sowie Blattfall, aber meist erst, wenn H_2S bereits geruchlich wahrnehmbar ist. Bei akuter Schädigung ist immer eine deutliche Abgrenzung zwischen lebendem und abgestorbenem Blattgewebe deutlich sichtbar. Bei chronischer Belastung kommt es eher zu einem sichtbar fließenden Übergang zwischen geschädigtem und ungeschädigtem Blattgewebe, mit Verfärbungen zwischen elfenbeinfarben bis hin zu rotbraun und vereinzelt auch schwarzen Flecken. (van Haut und Strathmann 1969) Auch Welkeerscheinungen ohne typische Blattverfärbungen wurden bereits festgestellt. H_2S ist weniger giftig als SO_2 . Für Pflanzen ist H_2S toxischer als für den Menschen.

2.4 Chlor (Cl)

Eine ausführliche Beschreibung der Wirkungen von Cl und HCl gibt Smidt (2010, 2013) wie folgt: Chlor zählt neben Fluor zu den reaktivsten Elementen und reagiert mit fast allen Elementen. Aufgrund der starken Neigung, Chlorwasserstoff zu bilden, reagiert Chlor auch mit anderen Wasserstoff enthaltenden Verbindungen wie Ammoniak, Schwefelwasserstoff oder Wasser. Elementares Chlor wirkt oxidierend und kann mit pflanzlichem und tierischem Gewebe reagieren. Chlor, das im Stoffwechsel nicht kovalent gebunden ist, ist ein essentielles Element. Das Chlorid-Ion wirkt in der Pflanzenzelle quellend, was u. a. bei der Stomataregulation von Bedeutung ist. Des Weiteren fungiert es bei der Photosynthese als Enzymaktivator bzw. beim Elektronentransport.

HCl und Chloride sind in erhöhter Konzentration für Pflanzen aggressiv (vgl. Kap. 4 und Anhang 1). Ebenfalls stark oxidierend wirkend und damit ohne biologische Funktionen sind Chlorverbindungen in hohen Oxidationsstufen wie etwa Chloroxide und Chlorsauerstoffsäuren. Die außerordentliche Reaktionsfreudigkeit von Chlor ist der Grund für seine Giftigkeit. Es reagiert in tierischem und pflanzlichem Gewebe und zerstört es dadurch. Die hier stattfindende Bildung von Chlorwasserstoff führt zu Verätzungen. Chlorid ist im Boden und in Pflanzen sehr mobil.

Chlorid ruft sichtbare Symptome wie Vergilbungen sowie Rand- und Spitzennekrosen, gefolgt von Blattabfall, hervor. Das Wurzelwachstum kann gehemmt werden und ganze Sprossbereiche können verdorren. Die kritische Konzentration im Pflanzengewebe liegt bei $10 \text{ mg Cl kg}^{-1} \text{ TS}$, also etwa beim 100-fachen der natürlichen Konzentration (Smidt 2010).

2.5 Chlorwasserstoff (HCl)

Nach Smidt (2010) ist die Bedeutung des HCl deutlich geringer als die von SO_2 und NO_x .

HCl-Gas wird über die Stomata aufgenommen und wandert mit dem Transpirationsstrom zur Blattspitze bzw. Nadelspitze und zum Blattrand. HCl kann die Quellung beeinflussen und so einen Stomatenschluss hervorrufen. Hydrolytische Enzyme werden gehemmt, das Kohlenhydratbudget gestört und die Proteinsynthese vermindert. In der Zelle kommt es zunächst zu einer Steigerung der Atmung, die jedoch bei zunehmender Einwirkung absinkt. Bei stärkerer Dosierung werden Membranen zerstört, die Photosynthese gehemmt und die Zellwand deformiert.

Sichtbare Wirkungen auf Pflanzen sind nach Smidt (2010):

- Ätزشäden an der Blattoberfläche
- Rotbraune bis braune Nekrosen (Flecken, Punktierungen), ausgehend von den Blatträndern bzw. Nadelspitzen, aber auch zwischen den Leitgefäßen
- Gelblich-hellbraune Verfärbung des Mesophylls (Zerstörung der Chloroplasten).
- Chlorgaseinwirkung erzeugt weiße Nekrosen.

Die HCl-Symptome ähneln oft jenen, die durch SO₂, HF oder O₃ sowie durch Trockenheit und Salzüberschuss hervorgerufen werden.

2.6 Formaldehyd (CH₂O)

Im Zuge der Entgiftung wird Formaldehyd in den Pflanzen in organische Aminosäuren, freie Zucker, Lipide und Zellwandkomponenten umgewandelt. Erst wenn dieses physiologische Entgiftungspotenzial überschritten wird, kommt es zu Schädigungen der Pflanze.

Formaldehyd kann in Pflanzen das Trockengewicht reduzieren sowie Chlorosen, Interkostal- und Blattrandnekrosen an älteren Blättern hervorrufen (Smidt 2010). Es ist etwa dreimal so toxisch wie SO₂.

2.7 Fluor

Fluor zählt zu den reaktionsfähigsten chemischen Verbindungen, die bereits bei geringen Immissionskonzentrationen zu Wuchsbehinderungen bei Pflanzen führen. Prinzipiell kommen für die Fluoraufnahme durch die Pflanze mehrere Pfade in Frage: die Aufnahme aus Wasser oder der Bodenlösung über die Wurzeln, das Eindringen gasförmiger Fluorverbindungen durch die Stomata, und die Diffusion der Lösungsprodukte gas- und partikelförmiger Fluorverbindungen durch die Cuticula (Blanckart 2009).

Eine Aufnahme von Fluorverbindungen aus dem Boden über die Wurzeln findet nur in sehr geringem Maße statt (Smidt 2010). Die F-Verfügbarkeit für Pflanzen ist auf Böden mit stark sauren pH-Werten am höchsten. Die F-Gehalte der Pflanzen sind vom Gesamt-F-Gehalt des Bodens unabhängig, da nur der lösliche Anteil pflanzenverfügbar ist.

Die Gefährdung der Vegetation durch Fluorderivate ergibt sich ganz überwiegend über den Gasaustausch der Blattoorgane. Hierbei erfolgt der Gasaustausch bzw. die Aufnahme von Fluorverbindungen, wie HF- oder SiF₄-Gas und auch in gelöster Form, überwiegend über die Blattöffnungen (Stomata). Diese F-Verbindungen können sich in den Blattoorganen anreichern. Für diese Anreicherung von Fluorderivaten in den Blattoorganen sind insbesondere Faktoren wie Dauer und Konzentration der Exposition sowie die Pflanzenart von Bedeutung. Je nach Pflanzenart ist eine mehr oder weniger hohe Anreicherung möglich.

Auch bei Fluorideinträgen ist zunächst eine Wachstumsstimulation zu beobachten, die erst bei Überschreitung einer Schwellenkonzentration in eine Schädigung von Pflanzenorganen umschlägt (Elstner u. Hippeli in Hock u. Elstner 1995, S. 95).

Fluorid vermag Enzymreaktionen zu hemmen, so dass physiologische Schädigungen der Pflanze auch ohne äußerlich erkennbare Symptome möglich sind. Bereits bei geringen Fluorkonzentrationen werden Enzyme verschiedener Stoffwechselwege gehemmt (VDI 2310 Blatt 3). Unter anderem werden die Glykolyse sowie die Gluconeogenese beeinflusst (vgl. ; Blanckart 2009).

Die Normalgehalte von Fluorid (F⁻) in Pflanzen betragen zwischen 5 und 50 mg kg⁻¹ TS, wobei einige Pflanzenfamilien, die in Deutschland aber nicht vorkommen, auch deutlich höhere Konzentrationen aufweisen können (Treshow 1984, 1994). Die meisten Arten ertragen Immissionskonzentrationen von 5 bis 10 µg F m⁻³ ohne größere Schädigung. Einige empfindliche Arten zeigen jedoch schon bei 300 ppm Symptome an den Blättern (ebenda). In der VDI 2310-Blatt 3 sind die Obergrenzen für sehr empfindliche, empfindliche und weniger empfindliche Pflanzen angegeben. Für die Buche beispielsweise beträgt die Konzentration als Mittel über die Vegetationsperiode 0,4 µg m³. Bei einer Überschreitung dieser Werte können typische Fluorschäden in Form von Spitzen- und Randnekrosen der Blätter auftreten. Nachdem die Fluoridionen aus der Zellwand in die Protoplasten eingedrungen sind, ist mit weiteren Schadwirkungen zu rechnen. Innerhalb des Blattes können auch länger anhaltende niedrigere Konzentrationen von 1 mg m⁻³ Blattvolumen zu erstgenannten Schädigungen führen, da sich in den Blättern Fluorid anreichert (Blanckart 2009).

Bei sichtbaren Schädigungen durch Fluor ist eine typische rötliche Färbung der betroffenen Blattoberfläche bei Chlorosen erkennbar. Bei Nekrosen verändert sich die Färbung ins Bräunliche.

2.8 Fluorwasserstoff (HF)

Die schnellste und wirksamste Form der Fluoraufnahme in Pflanzen erfolgt in Form von Fluorwasserstoff durch die Blattöffnungen (Stomata) (Halbwachs 2001). HF löst sich nach der Aufnahme über das Blatt im Zellwandwasser und wird mit dem Transpirationsstrom zu den Blatträndern bzw. Blattspitzen transportiert. In den parallelnervigen Blättern der einkeimblättrigen Pflanzen und in den Koniferennadeln wird Fluorid in Richtung Spitze verlagert, während in den netznervigen Blättern der meisten zweikeimblättrigen Pflanzen neben einer spitzenwärts gerichteten Verlagerung auch eine in Richtung Blattrand zu beobachten ist. Erst wenn die - artspezifisch sehr unterschiedliche - Schwellenkonzentration erreicht wurde, dringt Fluorid in die Zellen ein. Die Anreicherung in den Organellen ist stark von deren pH-Wert abhängig: Mit der Zunahme um eine pH-Einheit von sauer in Richtung alkalisch steigt der F-Gehalt um das Zehnfache (Blanckart 2009). Neutrale und schwach alkalische Kompartimente sind somit stärker belastet als saure (z. B. Chloroplasten). Die Anhäufung in diesen Regionen führt zu Nekrosen (ebenda).

Bei den empfindlicheren Pflanzen treten bereits bei kurzer Exposition mit hohen Dosen an Fluorwasserstoff (HF) erhebliche Schädigungen auf (vgl. Kap. 3 und Anhang 1). Kurzfristige HF-Konzentrationen oberhalb von 10 mg m⁻³ in der Luft können bereits ausreichen, um Blattschädigungen in Form von Blattnekrosen auszulösen. Bei weniger empfindlichen Pflanzen wird durch die Aufnahme von Fluorwasserstoff der Stoffwechsel der geschädigten Blattoorgane sehr schnell eingestellt, wodurch eine weitere Aufnahme verhindert wird (Blanckart 2009).

HF bildet mit Ca, Mg und Mn unlösliche Fluoride (Smidt 2010). Dies entzieht der Pflanze zwar Fluor, aber auch diese essentiellen Elemente. Es stört somit Stoffwechselforgänge, an denen diese Elemente als Kofaktor von Enzymen beteiligt sind ("Breitbandenzymhemmung").

Auch der Phosphathaushalt wird beeinträchtigt. Fluor greift Biomembranen an und führt zu Schwellungen der Thylakoide. Längere Einwirkung führt zu Stomataschluss.

Die Schadsymptome sind allgemein bei allen Pflanzen wie folgt zu charakterisieren (Blanckart 2009):

- Anreicherung in Blatträndern und -spitzen durch sekundäre Verlagerung
- Beeinflussung der Photosynthese, Respiration und Transpiration
- Veränderung von Wachstum und Entwicklung einzelner Organe
- Verfärbungen und Chlorosen
- Nekrosen
- Erhöhte Anfälligkeit gegenüber abiotischen und biotischen Stressfaktoren
- Störungen in der Fruktifikation
- Ertrags- und Qualitätsminderungen
- Änderungen in der Konkurrenzkraft
- Pflanzentod.

Insbesondere aus den Änderungen in der Konkurrenzkraft und dem Tod einzelner Pflanzen und letztendlich ihrer Population ergeben sich für die naturnahe Pflanzengesellschaft, die von der betroffenen Art diagnostisch bestimmt wird, mithin für das gesamte Ökosystem, folgende Konsequenzen:

- Änderungen der genetischen Struktur innerhalb von Arten
- Verschiebung in der Zusammensetzung und Artenverarmung
- Gefährdung von Konsumenten und Destruenten
- Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit von Ökosystemen einschließlich ihrer Stabilität und Befähigung zur Selbstregulierung.

3 Spezifische Empfindlichkeit der charakteristischen Pflanzenarten ausgewählter FFH-Lebensraumtypen

3.1 *Fagus sylvatica*, *Maianthemum bifolium*, *Carex pilulifera* (Hainsimsen-Buchenwald)

In Wäldern werden zunächst die Baumkronen durch Luftschadstoffeinträge betroffen. Die Hauptbaumarten sind dadurch einerseits besonders hoch belastet, weil sie die Luftschadstoffe praktisch aus der Atmosphäre auskämmen, andererseits schützen sie somit aber die Strauch-, Kraut- und Moosschicht, solange der Kronenschluss relativ hoch ist. Immissionsgrenzwerte für den Schutz von Wald-Lebensraumtypen müssen daher vorrangig auf den Schutz der Hauptbaumarten ausgerichtet sein. Die Hauptbaumarten des Lebensraumtyps Hainsimsen-Buchenwald sind die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) als dominante Baumart, gemischt mit Traubeneiche (*Quercus petraea*) oder/und Stieleiche (*Quercus robur*). In Nordrhein-Westfalen ist eine typische Waldgesellschaft dieses Lebensraumtyps für den ärmeren Flügel der Schattenblumen-Buchenwald (*Maianthemo-Fagetum sylvatici* PASS. 1959) mit der Schattenblume (*Maianthemum bifolium*) und Pillen-Segge (*Carex pilulifera*) als Charakterarten.

Fangmeier (1989, in Guderian 2001, Bd. 2A, S. 345) hat festgestellt, dass es unter hohen direkt einwirkenden Schadgaskonzentrationen von Schwefel- und Stickstoffverbindungen (sowie Ozon) auf ein Buchenwald-Ökosystem zu einem Zusammenbruch des Gefüges, d. h. der typischen Struktur der Gesellschaft, kommt. Zunächst werden die hohen Bäume

geschädigt, dann greifen die Schadstoffe in den entstandenen Lücken aber auch die Bodenvegetation an. Überlebenschancen haben nur die resistenten Arten wie Drahtschmiele (*Avenella flexuosa*). Weitere resistente Arten wie Landreitgras (*Calamagrostis epigeos*) wandern ein und leiten so eine sekundäre Sukzession zu einem neuen Fließgleichgewicht ein, das gekennzeichnet ist von geringer Artendiversität und geringer Stabilität.

Allerdings weist die Buche (*Fagus sylvatica*) nur eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber akuter SO₂-Exposition auf (Guderian 2001, S. 444; Dässler 1991; Dässler u. Börtitz 1988). Grandjot (1992) beurteilt die Buche sogar als „wenig sensitiv“ gegenüber SO₂-Einträgen. Die Widerstandsfähigkeit von Eichen (*Quercus petraea*, *Q. robur*) gegenüber SO₂ ist sogar besonders groß (Elling et al. 2007, S. 289). Das ist darin begründet, dass Eichen (wie auch einige andere Laubbaumarten) die Fähigkeit haben, nach Blattschädigungen in derselben Vegetationsperiode neue Sprosse und Blätter zu bilden („Johannistrieb“) und weisen somit eine höhere Regenerierungskapazität auf als Nadelgehölze (Dässler 1991; Dässler u. Börtitz 1988). Diese Fähigkeit haben Buchen jedoch kaum, so dass sie nach akuter Schädigung nur eine sehr geringe oder keine Regenerierungskapazität aufweisen. Eine akute Schädigung der Hauptbaumarten durch versauernde Einträge von SO₂ und NH₃ ist gekennzeichnet vom dominanten Auftreten säure- und aluminium-resistenter Arten wie *Avenella flexuosa* (Kaiser 1994, Klumpp et al. 1988).

Auch gegenüber NH₃-Einträgen weist die Buche (*Fagus sylvatica*) nur eine mittlere Empfindlichkeit auf (Dässler 1991), während Eichen (*Quercus petraea*, *Q. robur*) als gering empfindlich eingestuft werden (ebenda). Akute Blattschäden durch HF an Rotbuchen sind durch rotbraune Nekrosen am gesamten Blattrand gekennzeichnet. Bei sehr hohen HF-Konzentrationen dringen die Nekrosen zungenförmig bis in die Interkostalfelder ein (Guderian et al. 1969, S. 22). Bucher-Wallin (1974) konnte nicht feststellen, dass trotz nekrotischer Blätter nach HF-Immissionen ein beschleunigter Alterungsprozess an Buchen einsetzte. Je geringer der natürliche Gehalt an Ca, Mg, Mn in den Blättern, desto empfindlicher ist die Pflanze gegenüber HF-Einträgen (Smidt 2010). Der Gehalt an basischen Nährkationen ist in der Buche deutlich höher als in Fichte und Kiefer, aber geringer als in den Eichenarten (Jacobsen et al. 2002).

Der Buche (*Fagus sylvatica*) wird eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber HF-Einträgen zugeschrieben, während die Stieleiche (*Quercus robur*) als weitgehend tolerant eingestuft wird (Dässler 1991; Dässler u. Börtitz 1988; van Haut und Krause 1982). Gräser wie die Pillen-Segge (*Carex pilulifera*) weisen eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber HF-Einträgen auf (van Haut und Krause 1982).

Marti et al. (2015) stellten eine hohe Akkumulationskapazität von Buchen gegenüber Chlorid und HCl fest. Gasförmig ausgestoßene Chlorid-Ionen in der Luft reichern sich in den Buchenblättern an. Die mittleren Chlorid-Konzentrationen im Laub korrelieren dabei mit den Veränderungen in den Emissionen. So gelten Buche (*Fagus sylvatica*) und Stieleiche (*Quercus robur*) als mittelmäßig empfindlich gegenüber Chlorid und HCl (Dässler u. Börtitz 1988, Dässler 1991).

3.2 *Arrhenatherum elatius*, *Knautia arvensis*, *Tragopogon pratensis* (Artenreiche Wiesen)

Den Lebensraumtyp der artenreichen Frischwiesen dominiert in Nordrhein-Westfalen die Glatthafer-Gesellschaft (*Arrhenatheretum elatioris*). Weitere charakteristische regional typische Arten sind die Acker-Witwenblume (*Knautia arvensis*) und der Wiesen-Bocksbart (*Tragopogon pratensis*). Die Gesellschaft ist nur nachhaltig überlebensfähig, wenn sie regelmäßig, wenn auch relativ wenig, gemäht wird. Meist wird sie auch ein wenig gedüngt. Somit werden regelmäßig (i.d.R. zweimal im Jahr) belastete Biomasse entzogen. An einen kurzzeitig hohen Eintrag von Stickstoff sind die Arten angepasst, z. T. sogar darauf angewiesen.

De Jong (2004) konnte bei NH_3/NH_4 -Applikationsversuchen an *Brachypodium pinnatum*, *Bromus erectus* und *Arrhenatherum elatius* feststellen, dass sich *Arrhenatherum* auch bei einem erhöhten $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Angebot nicht auf Kosten der anderen Arten ausbreiten konnte. Daraus zog er den Schluss, dass in regelmäßig genutzten Halbtrockenrasen nur eine geringe Wahrscheinlichkeit besteht, dass stickstoffbedürftigere Arten zunehmen. Diese Feststellung lässt sich auch auf Frischwiesen übertragen.

Vermehren et al. (1994) fanden in einem Begasungsversuch mit SO_2 , dass selbst sehr hohe Konzentrationen von 85,5 nl/l nach 11-14 Wochen keine erkennbaren Schädigungen an *Poa pratensis*, *Dactylis glomerata*, *Holcus lanatus*, und *Arrhenatherum elatius* hervorgerufen hatten. Im Gegenteil: Einige hoch belastete Populationen zeigten eine höhere Wuchsleistung, andere die gleiche Wuchsleistung, verglichen mit weniger belasteten Populationen. Die Leitfähigkeit der Stomata war bei keiner Population durch SO_2 beeinträchtigt.

Auch Höglinger (2002) konnte in einem hoch belasteten Rauchschadensgebiet feststellen, dass *Arrhenatherum elatius* gegenüber SO_2 und HF relativ resistent ist.

Gräser weisen eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber HF-Einträgen auf, während eine geringe Empfindlichkeit für Korbblüter (*Knautia arvensis*, *Tragopogon pratensis*) gilt (van Haut und Krause 1982).

3.3 *Carex nigra*, *Ranunculus flammula* (Bodensaure Flachmoore)

Die in Nordrhein-Westfalen typische Gesellschaft der bodensauren Flachmoore ist die Binsen-Braunseggen-Gesellschaft (*Juncus-Caricetum fuscae* TX. 1952) mit der Braunsegge (*Carex nigra*, Synonym: *Carex fusca*) und dem Brennenden Hahnenfuß (*Ranunculus flammula*). Die Standorte dieser Gesellschaft sind gekennzeichnet von einem hohen Grundwasserstand, einem mittleren Säure-/Basen-Status (pH 4,8-6,4, Basensättigung 46-70%) und einem mittleren Kohlenstoff-/Stickstoff-Verhältnis (C/N 20-26) (Succow 1974). Demzufolge ist die typische Artengarnitur an mesotroph-schwach saure bis subneutrale Standortverhältnisse angepasst. Auch diese Flachmoorgesellschaft muss regelmäßig gemäht und / oder beweidet werden, um nachhaltig erhalten werden zu können. Allerdings wird sie nicht gedüngt (außer durch Tierkot bei Beweidung).

Der direkte Einfluss von gasförmigen Luftschadstoffen ist gering. Es überwiegt bei Weitem der Einfluss von Schad- und Fremdstoffen im Grund- und im Sickerwasser (Morris 1991). Direkte akute Schäden sind daher kaum zu erwarten. Aber auch kurzzeitig hohe Konzentrationen von Schadgasen in der Luft verursachen eine Anreicherung im Boden des Grundwassereinzugsgebietes eines Moores. Gerade kurzzeitig hohe Einträge können nicht so schnell von der Vegetation akkumuliert werden und werden daher ins Grundwasser

ausgewaschen. Insofern kann eine Moorgesellschaft indirekt über den lateralen Grundwasserzustrom beeinträchtigt werden, denn ihr Wurzelraum liegt teilweise im Grundwasser (Go-Horizont).

Aerts et al. (1995) fanden folgende Auswirkungen von N-Einträgen in Seggen-Moore: Solange N-Mangel im Ökosystem herrscht, führt eine NH_3 -Zufuhr zu einer Erhöhung der Biomasseproduktivität von *Carex*-Arten, das C/N-Verhältnis des Bodens und der organischen Substanz ändert sich nicht. Die C-Fixation erhöht sich. Bei P-limitierten Böden führt eine NH_3 -Zufuhr nicht zu einer Erhöhung der Biomasseproduktivität, das C/N-Verhältnis des Bodens und der organischen Substanz verringert sich, die C-Akkumulation verringert sich. Gräser wie die Braunsegge (*Carex nigra*) weisen eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber HF-Einträgen auf (van Haut und Krause 1982).

3.4 *Chara spec.* (Oligotrophe bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer)

Gasförmige Luftschadstoffe werden kaum in ein Gewässer direkt aus der Luft aufgenommen. Die Oberflächenrauigkeit von Gewässern ist so gering, dass der Eintrag von Gasen im Vergleich zum Eintrag aus dem lateral zufließendem schadstoffbelastetem Grund- und Oberflächenwasser vernachlässigbar gering ist. Ist der See z.B. von Wald umgeben, kann die indirekte Belastung aus dem Gewässereinzugsgebiet aber erheblich sein.

Die typischen Pflanzen der mesotrophen kalkhaltigen Gewässer sind evolutionär an hohe Basen- und Kohlenstoffgehalte angepasst. Die in Nordwestdeutschland vorkommende Armelechteralgen-Gesellschaft benötigt vorwiegend folgende Wertespannen der Wasserqualitätsparameter:

Charetum asperae Corillon 1957: pH: 7,9-8,4 (Pottgießer u. Sommerhäuser (2004)
Gesamt-Stickstoffgehalt: 0,1-0,4 mg/l TS Boden
(Ellenberg 1996)

Armelechteralgen (*Characeen*) wachsen am Grund der Seen auch in sehr großer Tiefe. Für ihre Photosynthese entziehen sie dem Wasser anorganische Kohlenstoffverbindungen. Eine Versauerung, hervorgerufen durch SO_2 - und/oder NH_3 -Depositionen, kann die Verfügbarkeit von CO_2 im Wasser soweit herab setzen, dass Unterwasserpflanzen nicht mehr lebensfähig sind (Morris 1991). In basenreichen Gewässern dominiert Kohlenstoff in Form von CO_3^{2-} . Säureeinträge (NO_2 und NH_3), die einen pH-Abfall verursachen, führen zum Wandel der dominanten Kohlenstoffform zu HCO_3^- und später zu CO_2 (Harriman et al. 2002). Durch Ausgasung verarmt der Kohlenstoffgehalt im Wasser, kann aber im Sediment verfügbar bleiben. So reagieren im Sediment wurzelnde Pflanzenarten wie die *Chara*-Species weniger empfindlich auf Versauerung als flutende Arten (Harriman et al. 2002).

Unter anaeroben Bedingungen z.B. im Faulschlamm stark eutrophierter oder versauerter Seen wird von einigen Bakterien Sulfat zu Schwefelwasserstoff H_2S reduziert um Energie zu gewinnen. H_2S greift wie SO_2 Chlorophyll bzw. die Chloroplasten an. Infolge dessen werden Photosynthese und Wachstum der grünen Pflanzen, auch der Armelechteralgen gehemmt (Harriman et al. 2002).

Als Nährstoff für den Stoffwechsel von Wasserpflanzen dient überwiegend Nitrat. Ammonium ist nur in Spuren in natürlichen unbelasteten Gewässern vorhanden. In belasteten

Gewässern überwiegt jedoch anthropogen verursachtes Ammonium. Ammonium kann von Pflanzen direkt, also schneller aufgenommen werden und führt zur Hemmung des Nitratreductase-Enzyms (Huber u. Huber in: Hock und Elstner 1995, S. 143). Typische Pflanzenarten natürlich ammoniumfreier oligo- bis mesotropher Gewässer wie die *Characeen* können aber nur in nitrathaltigen Gewässern wachsen und verschwinden nach Ammonium-Einträgen.

Für Süßwasser-Ökosysteme im Allgemeinen empfiehlt die EU (2001) einen PNEC (Predicted No Effect Concentration) für HF von 0,4-0,9 mg/l Wasser. Die EPA (1999) hat die Qualitätsziele für Süßwasser-Ökosysteme auf 11 µl HCl/l und 2 µg H₂S /l festgelegt. Janus u. Posthumus (2002) empfiehlt einen MTR (Maximal tolerierbares Risiko) für Formaldehyd in Süßwasser-Ökosystemen von 180 µg CH₂O/l Wasser.

3.5 *Calluna vulgaris*, *Molinia caerulea* (Trockene Heiden)

Die trockenen Heiden sind in Nordrhein-Westfalen durch die Englisch-Ginster-Besenheide-Gesellschaft (*Genisto anglicae-Callunetum vulgaris* SCHWICK. 1933 em. TX. 1937) und die Heidelbeer-Besenheide-Gesellschaft (*Vaccinio myrtilli-Callunetum* BÜK. 1942) vertreten. Beide Gesellschaften kommen auf nährstoffarmen, sauren und trockenen Böden vor. Sie werden von der Besenheide (*Calluna vulgaris*) zu annähernd 100% bedeckt. Das Pfeifengras (*Molinia caerulea*) kommt eher auf wechselfeuchten Standorten vor und ist daher selten in naturnahen norddeutschen trockenen Heidegesellschaften anzutreffen.

Zunächst führt ein NH₃-Eintrag bei der Besenheide zu einer erhöhten Assimilation, dies wiederum auch zu einer erhöhten Transpiration und schnell zu Dürrestress (Van der Eerden u. Pérez-Soba 1992). Die erhöhte Transpiration bei hohen NH₃- Konzentrationen und begrenzter nutzbarer Wasserkapazität des Bodens führt bei *Calluna vulgaris* bereits nach wenigen Tagen zu irreversiblen Schädigungen (Van der Eerden et al. 1991; Sheppard et al. 2008; Power et al. 1998). Die damit verbundene Reduzierung des Deckungsgrades in natürlich geschlossenen *Calluna*-Beständen führt zu Konkurrenzvorteilen für Gräser wie *Molinia caerulea* und *Avenella flexuosa* (Van der Eerden et al. 1990, Heil u. Bobbink 1993, Bobbink et al. 1992). Auch die Anfälligkeit gegenüber Heidekäfer-Invasionen erhöht sich durch die Auflichtung (Power et al. 1998).

Andererseits haben Versuche mit ¹⁵NH₃ ergeben (Dueck et al. 1991), dass *Calluna vulgaris* nach 4 bis 9 Wochen Begasung kaum NH₃ aus der Umgebungskonzentration in die Sprosse aufgenommen haben. Der Anteil an N, der aus der mit ¹⁵NH₃ angereicherten Luft aufgenommen wurde, betrug nach 4 Wochen 6% und nach 9 Wochen 15%. Bei *Avenella flexuosa* betrug dieser Anteil 17% bzw. 28%.

Auch Prins et al. (1991) fanden nach NH₄⁺-Applikation keine rasche Verdrängung von *Calluna* durch Gräser. Allerdings erhöhte sich die Sensitivität von *Calluna* und die Reproduktionsrate sank. So konnte eine harte Frostperiode größeren Schaden bei *Calluna* anrichten als auf ungedüngten Heideflächen, so dass sich nun in den Blößen *Molinia caerulea* und *Avenella flexuosa* ansiedeln konnten.

Molinia caerulea ist säureresistent und breitet sich nach Säureinträgen (SO₂ und NH₃) aus (Hogg et al. 1994). Auch Kopsch (2011) und Tomassen et al. (2003) fanden keine signifikante Beeinträchtigung der Wachstums-Parameter von *Molinia caerulea* bei hohen Gaskonzentrationen von NH₃.

SO₂ verursacht auf regenfeuchten Blattoberflächen eine Verätzung der epicuticulären Wachsschicht, wodurch die Alterung der Blätter und Nadeln beschleunigt wird (Ziegler in Hock u. Elstner 1995, S. 55; Uhlig 1996). Krautige Pflanzen, die fortlaufend neue Blätter

bilden, sind weniger gefährdet als immergrüne Pflanzen wie z.B. Besenheide (*Calluna vulgaris*) (Smidt 2010). Aber auch die sommergrüne Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*) reagiert relativ empfindlich auf SO₂-Einträge (Legge u. Krupa 2002).

Dueck et al. (1992) stellten in einem Begasungsversuch mit SO₂ an 14 Arten aus Heidegesellschaften fest, dass bei extrem hohen Konzentrationen (520 µg/m³) nach 6 Wochen Schädigungen erkennbar waren, jedoch sind die Arten der Beerkraut-/Ginster-Heiden (*Calluna vulgaris*) weniger empfindlich als die Arten der Borstgras-Heiden (z. B. *Nardus stricta*). Höglinger (2002) konnte in einem hoch belasteten Rauchschadensgebiet feststellen, dass *Molinia caerulea* gegenüber SO₂ und HF relativ resistent ist. Auch *Ericaceen* wie *Calluna vulgaris* weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber HF-Einträgen auf (van Haut und Krause 1982).

4 Critical Levels für Einträge gasförmiger Schadstoffe

4.1 Datengrundlagen

Ein Critical Level für Vegetation ist die Konzentration in der Atmosphäre (Immission), oberhalb derer direkte Schadefekte an sensibler Vegetation nach derzeitigem Wissen auftreten können (Ashmore u. Wilson 1993, ICP MODELLING & MAPPING 2004-2013, 2015.).

Die Ermittlung von Schwellenwerten fand bisher zu verschiedenen Phasen der Reaktion von Pflanzen auf den Eintrag von Luftschadstoffen statt. So gliedern sich die Reaktionsphasen nach Tesche (in Hock u. Elstner 1995, S. 421) wie folgt:

1. Phase: Alarmreaktion: in belasteten pflanzlichen Systemen werden charakteristische, aber hinsichtlich des Stressors unspezifische Reaktionen ausgelöst (z. B. Erhöhung der Membranpermeabilität, Akkumulation von Proteinen, Atmungssteigerung usw.)
2. Phase: Widerstands- und Adaptationsreaktion; es setzen spezifische Abwehrreaktionen ein, die u.U. eine zeitlich begrenzte Anpassung ermöglichen (z.B. osmotische Adaptation zum Schutz der Pflanze vor Austrocknung, Aktivierung von antioxidativen Reaktionen usw.)
3. Phase: Erschöpfungsreaktion; der Grenzbereich der Resistenz ist überschritten, es kommt zu sichtbarem Erkranken, Verfall und Absterben von Organen (z. B. Membranreduktion, Bildung von toxischen Metaboliten usw.).

Die bisher in der Literatur mitgeteilten Wirkungsschwellen können nur dann miteinander verglichen werden, wenn man sie vorab den einzelnen Phasen zuordnet und nur innerhalb der Gruppen miteinander vergleicht. Eine Besonderheit kann in Form der gesetzlich geregelten Grenzwerte oder politischen Zielwerten vorliegen, die sich nicht realistisch den Phasen zuordnen lassen, weil nicht nur wirkungsbezogene Aspekte zu ihrer Festsetzung geführt haben, sondern auch wirtschaftliche und sozialökonomische Aspekte eingeflossen sein können.

Aufgrund der Unmöglichkeit, für alle Pflanzenarten wirkungsbezogene Critical Levels zu ermitteln, kann und muss man die wenigen Hinweise in der Fachliteratur auf die spezifische Empfindlichkeit einiger Arten (Kap. 3) dazu nutzen, um Rückschlüsse darauf abzuleiten, ob die Art eher im unteren oder im oberen Bereich der aus den Literaturangaben für Vegetation im Allgemeinen abgeleiteten Critical Level-Spannen anzusiedeln ist.

Laut FFH-Richtlinie darf ein Schadstoffeintrag sich nicht erheblich nachteilig auf ein Natura 2000-Gebiet auswirken. Die Festlegung von Ursache-Wirkungs-Erheblichkeitsschwellen von Einträgen ist aufgrund der Komplexität der Ökosysteme und aufgrund der zeitverzögerten Erkennbarkeit von Wirkungen kaum möglich. In Ermangelung fachwissenschaftlich belegter und akzeptierter Schwellenwerte (Critical Levels) für einzelne Pflanzenarten oder Pflanzengesellschaften ist eine Null-Risiko-Schwelle anzusetzen, denn nur diese erfüllt beim gegenwärtigen Stand des Wissens die Voraussetzung für die Erlangung der Gewissheit über das Ausbleiben von erheblichen nachteiligen Veränderungen. Null Risiko heißt, dass die „maßgeblichen Bestandteile“ nicht geschädigt werden, also die Standorte nicht irreversibel degradiert werden und die gesellschaftsbestimmenden Arten ihre günstige Existenzmöglichkeit behalten oder diese wieder herstellbar sind. Critical Levels sind demzufolge dort anzusetzen, wo die Phase 2 in die Phase 3 übergeht.

Diese Bedingung erfüllen (Anhang 1)

- die NOEC-Grenzwerte (No observed effect concentration) der Österreichischen Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen (BGBl. 199 Österreich 1984)
- die Grenzwerte der Schweizerischen Luftreinhalteverordnung (Der Schweizerische Bundesrat 2015), die sich an der Österreichischen Verordnung orientieren
- die Grenzwerte des Schweizerischen Departement des Inneren (1985): Luftreinhalteverordnung.
- die Grenzwerte des Liechtensteinischen Luftreinhaltegesetzes (Liechtensteinisches Landesgesetzblatt vom 23. Dezember 1987), die sich an der Österreichischen Verordnung orientieren
- der PNEC (Predicted No Effect Concentration) der EU (European Union - Institute for Health and Consumer Protection) (2001)
- der MTR (Maximal tolerierbares Risiko) von Janus u. Posthumus (2002)
- die Empfehlungen des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU 1983)
- die Empfehlungen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (1996)
- die akzeptablen Limits von McCune et al. (2002)
- die Empfehlungen der UN/ECE (1988)
- die Richtwerte der VDI 2310 Blatt 3 (2011)
- die Zielwerte der Österreichischen Immissionsschutzgesetzes (BGBl. 298 Österreich 2001, BGBl. 62 Österreich 2001)
- Richtwerte, oberhalb dessen Schädigungen an Pflanzen auftreten können nach Smidt (2010, 2011).

Schwellenwerte, die nach ihrer Definition bereits sichtbare Effekte dokumentieren, erfüllen daher die Anforderungen der FFH-Richtlinie theoretisch nur unzureichend. Allerdings liegen die Werte der folgenden Quellen innerhalb der Spannen der NOEC bzw. PNEC-Werte der o.g. Quellen. Dies sind (Anhang 1):

- die akut phytotoxisch wirkende Konzentration nach Posthumus et al. (1991)
- die LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) nach Neumüller (1979), nach Van Eerden et al. (1991) und nach Wellburn (1988)
- die Immissionsgrenzen nach TA Luft (2002), da sie nicht wirkungsbezogen ermittelt wurden
- die Leitwerte der WHO (1987, 2000)
- die Qualitätsziele für Süßgewässer-Ökosysteme der US-EPA (1999).

Folgende Angaben sind keine wirkungsbezogenen Schwellenwerte, sondern politische Ziele, Die Werte liegen deutlich über den o.g. Wertespannen (Anhang 1):

- die Qualitätsziele für SO₂ der US-EPA (2000)

Keine der ausgewerteten Studien beschreibt einen Effekt auf eine einmalige kurzzeitig hohe Schadstoffkonzentration. Es werden vielmehr Ergebnisse von kontinuierlichen Messungen und Beobachtungen beschrieben. Die Messung bzw. Beobachtung nach kurzer Einwirkzeit gibt somit Aufschluss über Effektschwellen nach kurzer Einwirkzeit, jedoch keine Informationen über die Regenerierungsfähigkeit der beobachteten Pflanzen nach Beendigung der Einwirkung nach kurzer Zeit. Ebenso sind die Halbstunden-, Stunden- oder Tagesmittelwerte auf wiederkehrende kurzzeitige Einwirkungen ausgerichtet. Die andauernde oder wiederkehrende Einwirkung führt aber zu einer höheren Stresssituation und verminderter Regenerierungsfähigkeit der Pflanzen. Die vorgeschlagenen Critical Levels sind daher eher als konservative Annäherung an reale Schwellenwerte für einmalige Belastungen zu verstehen.

4.2 Critical Levels für *Fagus sylvatica*, *Maianthemum bifolium*, *Carex pilulifera* (Hainsimsen-Buchenwald)

Fagus sylvatica

Für *Fagus sylvatica* sind artspezifische Critical Levels für NH₃, SO₂, HF, und HCL wie folgt in der Literatur mitgeteilt:

NH₃: Halbstundenwert: 0,3 mg NH₃/m³, Tagesmittelwert: 0,1 mg NH₃/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)

SO₂: 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW): 0,15 mg SO₂/m³; Tagesmittelwert: 0,1 mg SO₂/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)

F, HF: Halbstundenwert: 6 µg HF/m³; Tagesmittelwert: 3 µg HF/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)

CL₂, HCL: Halbstundenwert: 0,6 mg HCl/m³; Tagesmittelwert: 0,2 mg NCl/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)

H₂S: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von 424 µg/m³ und des Tagesmittelwertes von 42,5 µg/m³ (Smidt 2010) muss daher auf *Fagus sylvatica* angewendet werden.

CH₂O: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein 180 µg/m³ (Janus u. Posthumus 2002).

Maianthemum bifolium, *Carex pilulifera*

Für die beiden Charakterarten des Hainsimsen-Buchenwaldes in Nordwestdeutschland sind in der Literatur keine art- oder artgruppenspezifische Critical Levels mitgeteilt. *Carex pilulifera* wird eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber HF-Einträgen bescheinigt. Da die Arten von der Buche beschirmt werden, können sie unabhängig von ihrer artspezifischen Empfindlichkeit als mittel empfindlich eingestuft werden (Kap. 3.1). Dementsprechend werden folgende Critical Levels vorgeschlagen:

| | |
|------------------------|--|
| NH ₃ : | Halbstundenwert: 0,27 mg NH ₃ /m ³ WHO 2000), Tagesmittelwert: 0,1 mg NH ₃ /m ³ (BGBl. 199 Österreich 1984) |
| SO ₂ : | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW): 0,4 mg SO ₂ /m ³ (SRU 1983; Tagesmittelwert: 0,1 mg SO ₂ /m ³ (WHO 1987) |
| F, HF: | Halbstundenwert: 6 µg HF/m ³ (BGBl. 199 Österreich 1984); Tagesmittelwert: 2 µg HF/m ³ (VDI (1989) |
| CL ₂ , HCL: | Halbstundenwert: 0,4 mg HCl/m ³ (BGBl. 199 Österreich 1984); Tagesmittelwert: 0,1 mg NCl/m ³ (BGBl. 199 Österreich 1984) |
| H ₂ S: | ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von 424 µg/m ³ und des Tagesmittelwertes von 42,5 µg/m ³ (Smidt 2010) muss daher auf <i>Maianthemum bifolium</i> und <i>Carex pilulifera</i> angewendet werden |
| CH ₂ O: | ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein 180 µg/m ³ (Janus u. Posthumus 2002). |

4.3 Critical Levels für *Arrhenatherum elatius*, *Knautia arvensis*, *Tragopogon pratensis* (Artenreiche Wiesen)

Arrhenatherum elatius

Für *Arrhenatherum elatius* sind in der Literatur keine artspezifischen Critical Levels mitgeteilt. Die Art wird jedoch als nicht empfindlich gegenüber NH₃, SO₂ und HF beschrieben (Kap. 3.2). Da der Tagesmittelwert für HF nach VDI (1989) höher als der höchste Halbstundenmittelwert ist, wird für den Halbstundenwert der höchste veröffentlichte Tagesmittelwert empfohlen. Dementsprechend werden folgende Critical Levels vorgeschlagen:

| | |
|------------------------|--|
| NH ₃ : | Halbstundenwert: 0,3 mg NH ₃ /m ³ , Tagesmittelwert: 0,1 mg NH ₃ /m ³ (BGBl. 199 Österreich 1984) |
| SO ₂ : | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW): 0,6 mg SO ₂ /m ³ (SRU 1983; Tagesmittelwert: 0,1 mg SO ₂ /m ³ (WHO 1987) |
| F, HF: | Halbstundenwert: 10 µg HF/m ³ (McCune et al. 2002); Tagesmittelwert: 7,5 µg HF/m ³ (VDI (1989) |
| CL ₂ , HCL: | Halbstundenwert: 0,4 mg HCl/m ³ (BGBl. 199 Österreich 1984); Tagesmittelwert: 0,1 mg NCl/m ³ (BGBl. 199 Österreich 1984) |
| H ₂ S: | ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von 424 µg/m ³ und des Tagesmittelwertes von 42,5 µg/m ³ (Smidt 2010) muss daher auf <i>Arrhenatherum elatius</i> angewendet werden |
| CH ₂ O: | ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein 180 µg/m ³ (Janus u. Posthumus 2002). |

Knautia arvensis, *Tragopogon pratensis*

Für *Knautia arvensis* und *Tragopogon pratensis* sind artspezifische Critical Levels nicht veröffentlicht. Gegenüber HF wurde für die beiden Korbblütengewächse eine geringe

Empfindlichkeit festgestellt (vgl. Kap. 3.2). Da der Tagesmittelwert für HF nach VDI (1989) höher als der höchste Halbstundenmittelwert ist, wird für den Halbstundenwert der höchste veröffentlichte Tagesmittelwert empfohlen. Ansonsten ist mangels anderslautender Hinweise als worst case eine hohe Empfindlichkeit anzunehmen. Dementsprechend werden folgende Critical Levels vorgeschlagen:

- NH₃: Halbstundenwert: 0,088 mg NH₃/m³, Tagesmittelwert: 0,03 mg NH₃/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- SO₂: Halbstundenmittelwert (HMW): 0,08 mg SO₂/m³ (Smidt 2010); Tagesmittelwert: 0,05 mg SO₂/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- F, HF: Halbstundenwert: 10 µg HF/m³ (McCune et al. 2002); Tagesmittelwert: 7,5 µg HF/m³ (VDI (1989))
- CL₂, HCL: Halbstundenwert: 0,38 mg HCl/m³ (Smidt 2011); Tagesmittelwert: 0,1 mg NCl/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- H₂S: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von 424 µg/m³ und des Tagesmittelwertes von 42,5 µg/m³ (Smidt 2010) muss daher auf *Knautia arvensis* und *Tragopogon pratensis* angewendet werden
- CH₂O: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein 180 µg/m³ (Janus u. Posthumus 2002).

4.4 Critical Levels für *Carex nigra*, *Ranunculus flammula* (Bodensaure Flachmoore)

Die Konzentration von Schadgasen direkt über dem Flachmoor ist wenig relevant für die Beurteilung seiner Gefährdung. Entscheidend ist die Konzentration im unmittelbaren Wassereinzugsgebiet des oberen Grundwasserleiters, der das waldfreie Flachmoor speist. Werden die Vegetationskomplexe im Einzugsgebiet geschädigt, kann es zu einem erheblichen Schadstoffeintrag mit dem Grund- und/oder Oberflächenwasser in das Moor kommen. Allerdings ist das Braunseggenried relativ gering empfindlich, da über die bestandserhaltende regelmäßige Mahd Schadstoffe in der Biomasse auch wieder dem Ökosystem entzogen werden (vgl. Kap. 3.3). Ist das Braunseggenried von Laubwald umgeben, gelten die Critical Levels für Buche (*Fagus sylvatica*) (vgl. Kap. 4.2). Ist das Ried von Frischwiesen umgeben, gelten die Critical Levels für *Arrhenatherum elatius* (vgl. Kap. 4.3). Ist das Ried jedoch von Nadel- oder Mischwald umgeben, werden folgende Critical Levels vorgeschlagen:

- NH₃: Halbstundenwert: 0,3 mg NH₃/m³, Tagesmittelwert: 0,1 mg NH₃/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- SO₂: 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW): 0,15 mg SO₂/m³; Tagesmittelwert: 0,05 mg SO₂/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- F, HF: Halbstundenwert: 0,9 µg HF/m³; Tagesmittelwert: 3 µg HF/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- CL₂, HCL: Halbstundenwert: 0,4 mg HCl/m³; Tagesmittelwert: 0,1 mg NCl/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)

- H₂S: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von 424 µg/m³ und des Tagesmittelwertes von 42,5 µg/m³ (Smidt 2010) muss daher auf Nadelwälder angewendet werden
- CH₂O: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein 180 µg/m³ (Janus u. Posthumus 2002).

4.5 Critical Levels für *Chara spec.* (Oligotrophe bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer)

Auch für Stillgewässer im Allgemeinen und für *Chara*-Seen im Besonderen gilt: Die Gefährdung durch Luftschadstoffe resultiert kaum aus einem direkten Eintrag aus der Luft ins Wasser, sondern überwiegend aus dem lateralen Zustrom belasteten Grund- und/oder Oberflächenwassers aus dem Einzugsgebiet des Sees. Gleichzeitig sind *Chara*-Spezies aber sehr empfindlich gegenüber NH₃ und SO₂-Einträgen. So sollten prinzipiell im Wassereinzugsgebiet die strengsten Schwellenwerte eingehalten werden.

Dementsprechend werden folgende Critical Levels für das Wassereinzugsgebiet vorgeschlagen:

- NH₃: Halbstundenwert: 0,088 mg NH₃/m³, Tagesmittelwert: 0,03 mg NH₃/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- SO₂: Halbstundenmittelwert (HMW): 0,08 mg SO₂/m³ (Smidt 2010); Tagesmittelwert: 0,05 mg SO₂/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- F, HF: Halbstundenwert: 0,9 µg HF/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984); Tagesmittelwert: 0,5 µg HF/m³ (VDI (1989))
- CL₂, HCL: Halbstundenwert: 0,38 mg HCl/m³ (Smidt 2011); Tagesmittelwert: 0,1 mg NCl/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- H₂S: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von 424 µg/m³ und des Tagesmittelwertes von 42,5 µg/m³ (Smidt 2010) muss daher auf *Chara spec.* angewendet werden.
- CH₂O: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein 180 µg/m³ (Janus u. Posthumus 2002).

4.6 Critical Levels für *Calluna vulgaris*, *Molinia caerulea* (Trockene Heiden)

Calluna vulgaris

Für *Calluna vulgaris* sind artspezifische Critical Levels für NH₃ als Stundenmittelwert ausgewiesen. Dieser kann gleichzeitig vorsorglich auch als Halbstundenwert gelten. Gegenüber SO₂-Einträgen ist *Calluna* empfindlich und reagiert wie ein immergrüner Nadelbaum. Auf HF-Einträge reagiert *Calluna* jedoch unempfindlich. Da der Tagesmittelwert für HF nach VDI (1989) höher als der höchste Halbstundenmittelwert ist, wird für den Halbstundenwert der höchste veröffentlichte Tagesmittelwert empfohlen. Für HCl gibt es

keine Hinweise, so dass vorsorglich vorerst der worst case angenommen werden muss. Dementsprechend werden folgende Critical Levels vorgeschlagen:

- NH₃: Stundenmittelwert (SMW): 3,3 mg NH₃/m³, Tagesmittelwert: 0,27 mg NH₃/m³ (Van der Eerden et al. 1991)
- SO₂: 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW): 0,15 mg SO₂/m³; Tagesmittelwert: 0,05 mg SO₂/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- F, HF: Halbstundenwert: 10 µg HF/m³ (McCune et al. 2002); Tagesmittelwert: 7,5 µg HF/m³ (VDI 1989)
- CL₂, HCL: Halbstundenwert: 0,38 mg HCl/m³ (Smidt 2011); Tagesmittelwert: 0,1 mg NCl/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- H₂S: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von 424 µg/m³ und des Tagesmittelwertes von 42,5 µg/m³ (Smidt 2010) muss daher auf *Calluna* angewendet werden
- CH₂O: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein 180 µg/m³ (Janus u. Posthumus 2002).

Molinia caerulea

Im Vergleich zu *Calluna* ist *Molinia* zwar weniger empfindlich gegenüber NH₃, in Ermangelung artspezifischer Schwellenwerte werden dieselben Critical Levels empfohlen. *Molinia caerulea* ist gegenüber SO₂ und HF relativ resistent (vgl. Kap. 3.5). Da der Tagesmittelwert für HF nach VDI (1989) höher als der höchste Halbstundenmittelwert ist, wird für den Halbstundenwert der höchste veröffentlichte Tagesmittelwert empfohlen. Für HCl gibt es keine Hinweise, so dass vorsorglich vorerst der worst case angenommen werden muss. Dementsprechend werden folgende Critical Levels vorgeschlagen:

- NH₃: Stundenmittelwert: 3,3 mg NH₃/m³, Tagesmittelwert: 0,27 mg NH₃/m³ (Van der Eerden et al. 1991)
- SO₂: 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW): 0,6 mg SO₂/m³ (SRU 1983; Tagesmittelwert: 0,1 mg SO₂/m³ (WHO 1987)
- F, HF: Halbstundenwert: 10 µg HF/m³ (McCune et al. 2002); Tagesmittelwert: 7,5 µg HF/m³ (VDI (1989)
- CL₂, HCL: Halbstundenwert: 0,38 mg HCl/m³ (Smidt 2011); Tagesmittelwert: 0,1 mg NCl/m³ (BGBl. 199 Österreich 1984)
- H₂S: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von 424 µg/m³ und des Tagesmittelwertes von 42,5 µg/m³ (Smidt 2010) muss daher auf *Molinia* angewendet werden
- CH₂O: ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level ist nicht veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein 180 µg/m³ (Janus u. Posthumus 2002).

5 Zusammenfassung

Die Europäische Seveso-III-Richtlinie sieht vor, dass unter dem Gesichtspunkt des Naturschutzes besonders wertvolle bzw. besonders empfindliche Gebiete in der Nachbarschaft von Betrieben erforderlichenfalls durch angemessene Sicherheitsabstände oder durch andere relevante Maßnahmen geschützt werden. Für die Bewertung phytotoxischer Expositionen sind im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens geeignete Beurteilungswerte bzw. -kriterien zu ermitteln. Der Untersuchungsumfang wird auf die Auswirkung störfallrelevanter Stofffreisetzungen ausgewählter gefährlicher Gase auf in naturschutzfachlich wertvollen oder empfindlichen Gebieten angesiedelte Pflanzen eingeschränkt.

Im Ergebnis einer Recherche (vgl. Dokumentation in Anhang 2) in den themenrelevanten Datenbanken BIOSIS, Chemical Abstract Datenbanken, ChemIDplus, HSDB und Toxline sowie ECOTOX (US EPA) und ETOX (UBA) konnten nur einige wenige Schwellenwerte für die Wirkungen ermittelt werden. Die Auswertung der themenrelevanten Fachliteratur in den Bibliotheken des Umweltbundesamtes, der TU Berlin, der Humboldt-Universität Berlin und des Zentrums für Agrar-Landschaftsforschung in Müncheberg sowie die Suche anhand der gegebenen Stichworte im World Wide Web ergab 87 themenbezogen relevante Literaturquellen. Die Suche wurde ausgeweitet anhand der Verweise in der Literatur auf weiterführende Quellen. Diese wurden über Fernleihe besorgt. Die Suche wurde abgebrochen, als in weiteren Literaturstellen nur noch Bezug auf bereits ausgewertete Quellen genommen wurde.

In Auswertung der verfügbaren Veröffentlichungen ergaben sich für die vom Auftraggeber vorgegebenen Schadgase und Pflanzenarten bzw. Biotope folgende Erkenntnisse:

Hainsimsen-Buchenwald:

Für die Buche (*Fagus sylvatica*) sind artspezifische Critical Levels für NH₃, SO₂, HF, und HCL in der Fachliteratur mitgeteilt. Die Buche gilt als mittelmäßig empfindlich. Für die beiden Charakterarten des Hainsimsen-Buchenwaldes in Nordwestdeutschland *Maianthemum bifolium* und *Carex pilulifera* sind in der Literatur keine art- oder artgruppenspezifische Critical Levels mitgeteilt. *Carex pilulifera* wird eine mittlere Empfindlichkeit gegenüber HF-Einträgen bescheinigt. Da die Arten von der Buche beschirmt werden, können sie unabhängig von ihrer artspezifischen Empfindlichkeit als mittel empfindlich eingestuft werden.

Artenreiche Wiesen:

Für *Arrhenatherum elatius* sind in der Literatur keine artspezifischen Critical Levels mitgeteilt. Die Art wird jedoch als nicht empfindlich gegenüber NH₃, SO₂ und HF beschrieben. Für *Knautia arvensis* und *Tragopogon pratensis* sind artspezifische Critical Levels ebenfalls nicht veröffentlicht. Gegenüber HF wurde für die beiden Korbblütengewächse eine geringe Empfindlichkeit festgestellt. Ansonsten ist mangels anderslautender Hinweise als worst case eine hohe Empfindlichkeit anzunehmen.

Bodensaure Flachmoore

Die Konzentration von Schadgasen direkt über dem Flachmoor ist wenig relevant für die Beurteilung seiner Gefährdung. Entscheidend ist die Konzentration im unmittelbaren Wassereinzugsgebiet des oberen Grundwasserleiters, der das waldfreie Flachmoor speist.

Werden die Vegetationskomplexe im Einzugsgebiet geschädigt, kann es zu einem erheblichen Schadstoffeintrag mit dem Grund- und/oder Oberflächenwasser in das Moor kommen. Allerdings ist das Braunseggenried mit *Carex nigra* und *Ranunculus flammula* relativ gering empfindlich, da über die bestandserhaltende regelmäßige Mahd Schadstoffe in der Biomasse auch wieder dem Ökosystem entzogen werden. Ist das Braunseggenried von Laubwald umgeben, gelten die Critical Levels für Buche (*Fagus sylvatica*). Ist das Ried von Frischwiesen umgeben, gelten die Critical Levels für *Arrhenatherum elatius*. Ist das Ried jedoch von Nadel- oder Mischwald umgeben, werden die Critical Levels für Fichte (*Picea abies*) empfohlen.

Oligotrophe bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer

Auch für Stillgewässer im Allgemeinen und für *Chara*-Seen im Besonderen gilt: Die Gefährdung durch Luftschadstoffe resultiert kaum aus einem direkten Eintrag aus der Luft ins Wasser, sondern überwiegend aus dem lateralen Zustrom belasteten Grund- und/oder Oberflächenwassers aus dem Einzugsgebiet des Sees. Gleichzeitig sind *Chara*-Spezies aber sehr empfindlich gegenüber NH_3 und SO_2 -Einträgen. So sollten prinzipiell im Wassereinzugsgebiet die strengsten Schwellenwerte eingehalten werden.

Trockene Heiden

Für *Calluna vulgaris* sind artspezifische Critical Levels für NH_3 als Stundenmittelwert ausgewiesen. Dieser kann gleichzeitig vorsorglich auch als Halbstundenwert gelten. Gegenüber SO_2 -Einträgen ist *Calluna* empfindlich und reagiert wie ein immergrüner Nadelbaum. Auf HF-Einträge reagiert *Calluna* jedoch unempfindlich.

Im Vergleich zu *Calluna* ist *Molinia* zwar weniger empfindlich gegenüber NH_3 , in Ermangelung artspezifischer Schwellenwerte werden dieselben Critical Levels empfohlen. *Molinia caerulea* ist gegenüber SO_2 und HF relativ resistent. Da der Tagesmittelwert für HF nach VDI (1989) höher als der höchste Halbstundenmittelwert ist, wird für den Halbstundenwert der höchste veröffentlichte Tagesmittelwert empfohlen. Für HCl gibt es keine Hinweise, so dass für beide Arten vorsorglich vorerst der worst case angenommen werden muss.

Ein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level für H_2S ist nicht veröffentlicht, die allgemeine Angabe des Halbstundenwertes von $424 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und des Tagesmittelwertes von $42,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Smidt 2010) muss daher auf alle Arten angewendet werden.

Ebenso ist für CH_2O kein art- oder artengruppenspezifischer Critical Level veröffentlicht, die einzige verfügbare Information bezieht sich auf einen Jahresmittelwert. Obwohl dieser in allen Fällen niedriger als ein Halbstunden- oder Tagesmittelwert ist, muss er vorläufig als worst case angesetzt werden. Er beträgt für Vegetation allgemein $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Janus u. Posthumus 2002).

Die jeweils empfohlenen Critical Levels sind in Tab. 1 im Überblick zusammengestellt. Dabei ergeben sich die Critical Levels für die Lebensraumtypen aus den jeweils niedrigsten Werten ihrer charakteristischen Arten.

Tab. 1: empfohlene Critical Levels für Halbstundenmittelwerte (HMW) und Tagesmittelwerte (TMW) im Überblick ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft)

| | empfohlene Critical Levels ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft) | | | | | |
|---|---|-----------------|-------|---------|------------------|-------------------|
| | NH ₃ | SO ₂ | F, HF | Cl, HCl | H ₂ S | CH ₂ O |
| <i>Fagus sylvatica</i> | | | | | | |
| HMW | 300 | 150 | 6 | 600 | 424 | 180 |
| TMW | 100 | 100 | 3 | 200 | 42,5 | 180 |
| <i>Maianthemum bifolium, Carex pilulifera</i> | | | | | | |
| HMW | 270 | 400 | 6 | 400 | 424 | 180 |
| TMW | 100 | 100 | 2 | 100 | 42,5 | 180 |
| Hainsimsen-Buchenwald | | | | | | |
| HMW | 270 | 150 | 6 | 400 | 424 | 180 |
| TMW | 100 | 100 | 2 | 100 | 42,5 | 180 |
| <i>Arrhenatherum elatius</i> | | | | | | |
| HMW | 300 | 600 | 10 | 400 | 424 | 180 |
| TMW | 100 | 100 | 7,5 | 100 | 42,5 | 180 |
| <i>Knautia arvensis, Tragopogon pratensis</i> | | | | | | |
| HMW | 88 | 80 | 10 | 380 | 424 | 180 |
| TMW | 30 | 50 | 7,5 | 100 | 42,5 | 180 |
| Artenreiche Wiesen | | | | | | |
| HMW | 88 | 80 | 10 | 380 | 424 | 180 |
| TMW | 30 | 50 | 7,5 | 100 | 42,5 | 180 |
| Laubwald im Wasser-Einzugsgebiet des bodensauren Flachmoores | | | | | | |
| HMW | 270 | 150 | 6 | 400 | 424 | 180 |
| TMW | 100 | 100 | 2 | 100 | 42,5 | 180 |
| Nadelwald im Wasser-Einzugsgebiet des bodensauren Flachmoores | | | | | | |
| HMW | 300 | 150 | 0,9 | 400 | 424 | 180 |
| TMW | 100 | 50 | 3 | 100 | 42,5 | 180 |
| Frischwiese im Wasser-Einzugsgebiet des bodensauren Flachmoores | | | | | | |
| HMW | 88 | 80 | 10 | 380 | 424 | 180 |
| TMW | 30 | 50 | 7,5 | 100 | 42,5 | 180 |
| Vegetation im Wasser-Einzugsgebiet des oligotrophen bis mesotrophen kalkhaltigen Gewässers | | | | | | |
| HMW | 88 | 80 | 0,9 | 380 | 424 | 180 |
| TMW | 30 | 50 | 3 | 100 | 42,5 | 180 |
| <i>Calluna vulgaris</i> | | | | | | |
| HMW | 3300 | 150 | 10 | 380 | 424 | 180 |
| SMW | 3300 | | | | | |
| TMW | 270 | 50 | 7,5 | 100 | 42,5 | 180 |
| <i>Molinia caerulea</i> | | | | | | |
| HMW | 3300 | 600 | 10 | 380 | 424 | 180 |
| TMW | 270 | 100 | 7,5 | 100 | 42,5 | 180 |
| Trockene Heiden | | | | | | |

| | empfohlene Critical Levels ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft) | | | | | |
|-----|---|-----------------|-------|---------|------------------|-------------------|
| | NH ₃ | SO ₂ | F, HF | Cl, HCl | H ₂ S | CH ₂ O |
| HMW | 3300 | 150 | 10 | 380 | 424 | 180 |
| TMW | 270 | 50 | 7,5 | 100 | 42,5 | 180 |

Keine der ausgewerteten Studien beschreibt einen Effekt auf eine einmalige kurzzeitig hohe Schadstoffkonzentration. Es werden vielmehr Ergebnisse von kontinuierlichen Messungen und Beobachtungen beschrieben. Die Messung bzw. Beobachtung nach kurzer Einwirkzeit gibt somit Aufschluss über Effektschwellen nach kurzer Einwirkzeit, jedoch keine Informationen über die Regenerierungsfähigkeit der beobachteten Pflanzen nach Beendigung der Einwirkung nach kurzer Zeit. Ebenso sind die Halbstunden-, Stunden- oder Tagesmittelwerte auf wiederkehrende kurzzeitige Einwirkungen ausgerichtet. Die andauernde oder wiederkehrende Einwirkung führt aber zu einer höheren Stresssituation und verminderter Regenerierungsfähigkeit der Pflanzen. Die vorgeschlagenen Critical Levels sind daher eher als konservative Annäherung an reale Schwellenwerte für einmalige Belastungen zu verstehen.

Quellen:

- Aerts, R. ; Logtestijn, R. ; Staalduinen, M. ; Toet, S. (1995): Nitrogen supply effects on productivity and potential leaf litter decay of *Carex* species from peatlands differing in nutrient limitation. *Oecologia* 104(4):447-453
- Anderson, L.E., Muschinek, G., Marques, I. (1988): Effects of SO₂ and sulfite on stomal metabolism. In: Schulte-Hostede, S., Darrall N.M., Blank, L.W., Wellburn, A.R. (ed.): Air pollution and plant metabolism. Elsevier, London, S. 134-147
- Ashmore, M.R., Wilson, R.B. (Hsg.) (1993): Critical levels of Air Pollutants for Europe. Background Papers prepared for the ECE Workshop on critical levels, Egham, United Kingdom, 23-26 March 1992.
- Bell J.N.B., Treshow M. (2002): Air pollution and plant life, 2nd edition. Wiley, Hoboken, New York 465 S.
- BGBL. Österreich 199 (1984): Zweite Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen vom 22. Mai 1984
- BGBL. Österreich 298 (2001): VO des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Immissionsgrenzwerte und Immissionszielwerte zum Schutz der Ökosysteme und der Vegetation
- BGBL. Österreich 62(2001): Bundesgesetz, mit dem das Immissionsschutzgesetz (BGBL. 115/1997) geändert und das Smogalarmgesetz aufgehoben wird; auf der Grundlage der 1. Tochterrichtlinie: 1999/30/EG: „Richtlinie des Rates über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft“ ; Rahmenrichtlinie 1996/62/EG: Richtlinie des Rates über die Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität
- Blanckart, P. (2009): Biomonitoring von Flurwasserstoff: Neue Ansätze zum Einsatz höherer Pflanzen als Akkumulationsindikatoren. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften. 232 S.
- Bobbink, R., Heil, G, Raessen, M. (1992): Atmospheric deposition and canopy exchange processes in heathland ecosystems. *Environmental Pollution*, 1992, Vol.75(1), pp.29-37
- Bucher-Wallin, I.K. (1974): Einfluss von Fluor-Immissionen auf das physiologische Blattalter von Waldbäumen. Dissertationsschrift. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. URL: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:31359/eth-31359-01.pdf>
- Dässler H.G. 1991: Einfluss von Luftverunreinigungen auf die Vegetation. Gustav Fischer Jena. 266 S.
- Dässler H.G., Börtitz, S. (1988): Air pollution and its influence on Vegetation. Dr. W. Junck Publishers Dordrecht – Boston – Lancaster
- Der Schweizerische Bundesrat (2015): Luftreinhalteverordnung (LRV) vom 16.12.1985, Anhang 7 in der Fassung gemäss Ziff. II der V vom 14. Okt. 2015, in Kraft seit 16. Nov. 2015 (AS 2015 4171)
- De Jong, M. (2004): Reaktionen von drei Süßgrasarten mit unterschiedlichen Nährstoffansprüchen auf erhöhte NH₃ -Konzentrationen und NH₄⁺ -Gaben in Rein- und in Mischkultur. Dissertation an der Universität Giessen. <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2004/1433/>
- Dueck, T.A., Van der Eerden, L.J., Beemsterboer, B., Elderson, J. (1991): Nitrogen uptake and allocation by *Calluna vulgaris* (L.) Hull and *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin. exposed to nitrogen-15 ammonia. *Acta Bot. Neerl* 40(4):257-268
- Dueck, T.A., Van der Eerden, L.J., Berdowski, J.J.M. (1992): Estimation of sulfur dioxide effect thresholds for heathland species. *Funct Ecol.* 6(3):291-296
- Ellenberg, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 5. stark veränd. und verb. Aufl., Ulmer Verlag. Stuttgart. 1096 S.
- Elling W., Heber U., Polle A., Beese F. (2007): Schädigung von Waldökosystemen. Auswirkungen anthropogener Umweltveränderungen und Schutzmaßnahmen. Elsevier Amsterdam, New York, Tokio.

- Elstner, E.F., Hippeli, S. (1995): Schadstoffe aus der Luft. In: Hock, B, Elstner, E.F. (Hrsg.): Schadwirkungen auf Pflanzen – Lehrbuch der Pflanzentoxikologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg-Berlin-Oxford
- European Union (Institute for Health and. Consumer Protection) (2001): Risk Assessment Report hydrogen fluoride. EINECS No.: 231-634-8. CAS No.: 7664-39-3.
- Fangmeier, A., Guderian, R. (2000): Wirkungen auf Pflanzengesellschaften. In: Guderian R. (Hrsg.) 2000: Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie: Terrestrische Ökosysteme. Band 2A. Kap. 4.1.2, Springer Berlin.
- Fangmeier, A., Hadwiger-Fangmeier, A., Van der Eerden, L., Jäger, H. J. (1994): Effects of atmospheric ammonia on vegetation – A review. *Environmental Pollution*, 1994, Vol.86(1), pp.43-82
- Grantjot, W. (1992): Waldwirtschaft – Naturnahe Waldwirtschaft, Standort, Baumarten, Waldschutz, Waldbewirtschaftung, Technik, Betriebsführung, Bd. 6, 4. Aufl., BLV, München.
- Guderian R. (Hrsg.) (2000): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie: Terrestrische Ökosysteme. Band 2A. Springer Berlin.
- Guderian R. (Hrsg.) (2001): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie: Terrestrische Ökosysteme. Band 2B. Springer Berlin.
- Guderian, R. (1977): Air pollution. *Ecol Stud* 22. Springer-Verlag Berlin – Heidelberg – New York.
- Guderian, R., Van Haut, H., Stratmann, H. (1969): Experimentelle Untersuchungen über pflanzenschädigende Fluorwasserstoff-Konzentrationen. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2017 Westdeutscher Verlag GmbH Köln und Opladen
- Halbwachs, G (2001): Fluoride. In : Guderian, R. (Hrsg.): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Band 2b Terrestrische Ökosysteme – Immissionsökologische Grundlagen, Wirkungen auf Pflanzen, Diagnose und Überwachung, Wirkungen auf Tiere. Springer, Berlin, 63-78
- Harriman, R., Battarbee, R.W., Monteith, D.T. (2002): Effects of acidic deposition on aquatic ecosystems. In: Bell J.N.B., Treshow M.: Air Pollution and plant life, 2nd edition. Wiley, Hoboken, 163-172.
- Heil, G.W., Bobbink, R. (1993): “Calluna”, a simulation model for evaluation of impacts of atmospheric nitrogen deposition on dry heathlands. *Ecological Modelling*, 1993, Vol.68(3), pp.161-182
- Herschbach, C., De Kok, L.J., Rennenberg, H. (1995): Net uptake of sulfate and its transport to the shoot in spinach plants fumigated with H₂S or SO₂: does atmospheric sulfur affect the inter-organ“ regulation of sulfur nutrition? *Botania Acta* 108:41-46
- Hippeli S. und Elstner E.F. 1996: Mechanisms of oxygen activation during plant stress: Biochemical effects of air pollutants. *J. Plant Physiol.* 148, 249-257.
- Hock B., Elstner E.F. 1995: Pflanzentoxikologie. BI Wissenschaftsverlag, Bibliographisches Institut Mannheim - Wien - Zürich.
- Hogg, P. ; Squires, P. ; Fitter, A.H. (1995): Acidification, nitrogen deposition and rapid vegetational change in a small valley mire in Yorkshire. *Biological Conservation*, 1995, Vol.71(2), pp.143-153
- Höglinger, F. (2002): Vegetationsverhältnisse im Rauchschadengebiet von Lenzing (Oberösterreich). *Beiträge Naturkunde Österreich* 11:223-265. URL: http://www.zobodat.at/pdf/BNO_0011_0223-0265.pdf
- Huber, W., Huber, A. (1995): Schadstoffbelastungen für Wasserpflanzen. In: Hock, B, Elstner, E.F. (Hrsg.): Schadwirkungen auf Pflanzen – Lehrbuch der Pflanzentoxikologie. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg-Berlin-Oxford
- ICP Modeling and Mapping (ed.) (2004-2013): Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads & levels. Print version German Federal Environmental Agency UBA-Texte 52/2004. Updated version 04/2013. Online im Internet. URL: www.icpmapping.org
- ICP Modeling and Mapping (ed.) (2015): Draft Revision of Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads & levels. Stand August 2015. Online im Internet. URL: www.icpmapping.org
- Irwin, J.G., Williams, M.L. (1988): Acid rain: chemistry and transport. *Environ Pollut* 50:29-59

- Jacobsen, C., Rademacher, P., Meesenburg, H., Meiwes, K. J. (2002): Element-Gehalte in Baum-Kompartimenten: Literatur-Studie und Datensammlung. Göttingen: Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Report, p 80
- Janus, J.A., Posthumus, R. (2002): Environmental Risk Limits for 2-propanol, formaldehyde 2nd 4-chloromethylphenols - updated proposals. RIVM report 601501015/2002.
<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/601501015.pdf>
- Kaiser, W. M. (Hrsg.) (1994): Ammoniumtoxizität bei Pflanzen, insbesondere bei Laubbäumen: NH₃/NH₄⁺-Aufnahme, Akkumulation und Wirkung auf Ionenkompartimentierung und Stoffwechsel. Im Gesamtprojekt des StMLU "Waldschadensforschung und Wirkungen von Umweltschadstoffen" / Projektgruppe Bayern zur Erforschung der Wirkung von Umweltschadstoffen (PBWU). Lehrstuhl Botanik der Universität Würzburg, 167 S.
- Klump, A., Klump, R., Guderian, R. (1988): Wuchsleistung und äußere Schädigungsmerkmale bei Buche nach Einwirkung von Ozon, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid. Allg. Forst. Zeitschr. 43:731-734
- Kopsch, J. (2011): Air Pollution by Particulate Matter and Ammonia at Suburban and Rural Sites in the North China Plain. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. sc. agr.) vorgelegt der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim
- Legge, A.H., Krupa, S.V. (2002): Effects of sulphur dioxide. In: Bell J.N.B., Treshow M.: Air pollution and plant life, 2nd edition. Wiley, Hoboken, S. 135-162.
- Liechtensteinisches Landesgesetzblatt vom 23. Dezember 1987: Verordnung vom 24. August 1987 zum Luftreinhaltegesetz vom 20. November 1985.
- Marti, J., Bertini, R., Günthardt-Goerg, M.S. (2015): 40 Jahre Umweltmonitoring im Einflussgebiet einer Kehrlichtverbrennungsanlage. Schweiz. Z. Forstwes. 166, 1: 32-39.
- McCune, D.C., Weinstein, L.H. (2002): Effects of Fluorides. In: Bell J.N.B., Treshow M.: Air pollution and plant life, 2nd edition. Wiley, Hoboken, 163-172.
- Morris, J. (1991): Effects of Nitrogen Loading on Wetland Ecosystems with Particular Reference to Atmospheric Deposition. Annual Review of Ecology and Systematics, 1 January 1991, Vol.22, pp.257-279
- Neumüller O. (1979): Römpps Chemie Lexikon. 8. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Franck Fachlexikon. Stuttgart.
- Österreichische Akademie der Wissenschaften, Kommission Reinhaltung der Luft (1996): Luftqualitätskriterien VOC. BM f. Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
- Posthumus, A.C. (1991): Effects of air pollution on plants and vegetation. In: Rozema, J., Verkleij, J.A.C. (Hrsg.): Ecological responses to Environmental Stress, Kap. 17, S. 191-198. Kluwer Academic Publisher, Netherlands
- Pottgiesser, T. und Sommerhäuser, M. (2004): Fließgewässertypologie Deutschlands: Die Gewässertypen und ihre Steckbriefe als Beitrag zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie. In: Steinberg, C., Calmano, W., Wilken, R.-D., Klapper, H. (Hrsg.): Handbuch der Limnologie. 19. Erg.Lfg. 7/04. VIII-2.1: 1-16 + Anhang.
- Power, S. A. ; Ashmore, M. R. ; Cousins, D. A. ; Sheppard, L. J. (1998): Effects of Nitrogen Addition on the Stress Sensitivity of *Calluna vulgaris*. New Phytologist, 138(4):663-673
- Prins, A.H., Berdowski, J. J. M., Latuhihin, M.J. (1991): Effect of ammonia fertilization on the maintenance of a *Calluna vulgaris* vegetation. Acta Botanica Neerlandica 40(4):269-280
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (1983): Waldschäden und Luftverunreinigungen, Sondergutachten 1983 des SRU. Drucksache des Deutschen Bundestages Nr. 10 / 113.
- Schweizerisches Departement des Inneren (1985): Luftreinhalteverordnung.
- Sheppard, L.J., Leith, I.D., Crossley, A., Van Dijk, N., Fowler, D., Sutton, M.A., Woods, C. (2008): Stress responses of *Calluna vulgaris* to reduced and oxidised N applied under 'real world conditions'. Environ Pollut. 2008, Aug; 154(3):404-13
- Smidt S. (2010): Wirkungen atmosphärischer Spurenstoffe auf Pflanzen unter besonderer Berücksichtigung von Waldbäumen. BFW-Dokumentation 8/2010. Wien.

- Smidt, S. (2011): Tabellenhang 3 zum Lexikon für waldschädigende Luftverunreinigungen. http://bfw.ac.at/400/smilex/AA2_GESAMTTABELLE_3_230811.pdf (Stand: 15.3.2016)
- Smidt, S. (2013): Lexikon für waldschädigende Luftverunreinigungen. <http://bfw.ac.at/rz/wlv.lexikon> (Stand: 15.3.2016)
- Succow, M. (1974): Vorschlag einer systematischen Neugliederung der mineralbodenwasserbeeinflussten wachsenden Moorvegetation Mitteleuropas unter Ausklammerung des Gebirgsraumes. In: Feddes Repertorium, Band 85, Heft 1-2:57-113. Berlin 1974.
- TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002. GMBI. 2002, Heft 25 - 29, S. 511 - 605.
- Temple, P.J., Harper, D.S., Pearson, R.G., Linzon, S.N. (1979): Toxic effects of ammonia on vegetation in Ontario. *Environmental pollution* 18:297-301. In: Fangmeier, A., Hadwiger-Fangmeier, A., Van der Eerden, L., Jäger, H._J. (1994): Effects of atmospheric ammonia on vegetation – A review. *Environmental Pollution*, 1994, Vol.86(1), pp.43-82
- Tesche, M. (1995): Stress bei Pflanzen: Allgemeine und historische Aspekte. In: Hock, B, Elstner, E.F. (Hrsg.): *Schadwirkungen auf Pflanzen – Lehrbuch der Pflanzentoxikologie*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg-Berlin-Oxford
- Tomassen, HBM., Smolders, AJP; Lamers, LPM; Roelofs, JGM (2003): Stimulated Growth of *Betula pubescens* and *Molinia caerulea* on Ombrotrophic Bogs: Role of High Levels of Atmospheric Nitrogen Deposition. *Journal of Ecology*, 1 June 2003, Vol.91(3), pp.357-370
- Treshow M. (1984): Diagnosis of Air Pollution Effects and Mimicking Symptoms. In: Treshow M. (ed.) *Air Pollution and plant life* S. 102. John Wiley & Sons Chichester, New York.
- Treshow M. (ed.) (1994): *Air Pollution and plant life*. John Wiley & Sons Chichester, New York.
- Uhlig, M. (1996): Untersuchung an Epikutikularwachsen von Blättern der Rotbuche (*Fagus silvatica* L.) aus dem südsächsischen Immissionsgebiet. Dissertation; Technische Universität Dresden. Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
- UN/ECE (1988): ECE Critical Levels Workshop, Report from a workshop held at Bad Harzburg, Germany 1.-18. March 1988, UBA Berlin
- US-EPA (United States Environmental Protection Agency. Washington, DC. Office of Water) (1999): National recommended water quality criteria-correction.EPA-822-Z-99-001. PB99-149189
- US-EPA (United States Environmental Protection Agency) (2000): <http://www.epa.gov/airs/criteria.html>
- Urbach, W. (Hrsg.)(1990): "Wirkungen von Umweltschadstoffen (SO₂, O₃ und NO_x) auf Photosynthese und Membranen intakter Blätter und Pflanzen" im Gesamtprojekt des StMLU "Waldschadensforschung und Wirkungen von Umweltschadstoffen" / Projektgruppe Bayern zur Erforschung der Wirkung von Umweltschadstoffen (PBWU). Lehrstuhl Botanik der Universität Würzburg, 412 S.
- Van Camp, W., Van Montagu, M., Inzé, D. (1994): Superoxid dismutases. In: Foyer, C.H., Mullineaux, P.M. (eds.): *Causes of photooxidative stress and amelioration of defense systems in plants*. CRC Press, Boca Raton S. 317-341
- Van der Eerden, L, J. M., Dueck, T. A., Elderson, J., Van Dobben, H. F., Berdowski, J. J. M., Latuhihin, M. & Prins, A. H. (1990). Effects of NH₃ and (NH₄)₂SO₄ deposition on terrestrial semi-natural vegetation on nutrientpoor soils. Project 124/125, phase II, Dutch Priority Programme on Acidification, IPO report R90/06, RIN report 90/20.
- Van der Eerden, L.J.M., Dueck, T.A., Berdowski, J.J.M., Greven, H., Van Dobben, H.F. (1991): Influence of NH₃ and (NH₄)₂SO₄ on heathland vegetation. *Acta Botanica Neerlandica* 40, 281–297
- Van der Eerden, L.J.M., Pérez-Soba, M. (1992): Physiological responses of *Pinus sylvestris* to atmospheric ammonia. *Trees* 6:48-53
- Van Haut, H. und Krause H.G.M., (1982): Flurwasserstoffwirkungen auf Pflanzen. Berichte des Landesamtes für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LIS Bericht 25). Essen
- Van Haut H., Stratmann H. (1969): Farbtafelatlas über Schwefeldioxid-Wirkungen an Pflanzen. Verlag W. Girardet Essen

- Van Haut H., Stratmann H. 1975: Experimentelle Untersuchungen über die Wirkung von NO₂. Staub Reinh. Luft 35, 187-193.
- Verein Deutscher Ingenieure (2011) Richtlinie 2310, Blatt 3: Maximale Immissionswerte zum Schutze der Vegetation
- Vermehren, B., Fangmeier, A., Jäger, H.-J. (1994): Adaptation of grasses to long-term sulphur dioxide pollution. *Angewandte Botanik* 68(3-4):95-103
- Wellburn (1988): Air pollution and acid rain. The biological impact. Longman Singapore Publishers Ltd. New York
- WHO (1987): Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publications, European Series No. 23, Kopenhagen.
- WHO (World Health Organization) (2000): Air quality Guidelines for Europe. 2. Aufl., WHO regional Publications, European Series, Nr. 91
- Ziegler, H. (1995): Weg der Schadstoffe in die Pflanze. In: Hock, B, Elstner, E.F. (Hrsg.): *Schadwirkungen auf Pflanzen – Lehrbuch der Pflanzentoxikologie*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg-Berlin-Oxford

Anhang 1: Zusammenstellung der veröffentlichten Schwellenwerte für den Schutz von Pflanzen und Vegetation gegen kurzzeitige Schadgasimmissionen

| Schutzgut | Schadstoff | Bezugszeit | Schwellenwert | Qualitätsmerkmal | Quelle |
|--|-----------------|---|---------------------------------|--|---------------------------|
| Vegetation allg. | NH ₃ | akut phytotoxisch wirkende Konzentration | 1000 ppb=0,7 mg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Posthumus et al. (1991) |
| Pflanzen | NH ₃ | Minimalkonzentration, bei der akute Effekte auftreten können | 350 ppb=0,247 mg/m ³ | LOEC | Wellburn (1988) |
| Vegetation | NH ₃ | Halbstundenmittelwert (HMW) | 126 ppb=0,088 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBl. 199 Österreich 1984 |
| Vegetation allg. | NH ₃ | Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,27 mg/m ³ | Leitwert | WHO (2000) |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | NH ₃ | Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,3 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBl. 199 Österreich 1984 |
| Laubwälder (gemessen an <i>Fagus sylvatica</i>) | NH ₃ | Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,3 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBl. 199 Österreich 1984 |
| <i>Calluna vulgaris</i> | NH ₃ | Stundenmittelwert | 3,3 mg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Van Eerden et al. (1991) |
| Vegetation | NH ₃ | Tagesmittelwert (HMW) | 42 ppb=0,03 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBl. 199 Österreich 1984 |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | NH ₃ | Tagesmittelwert (HMW) | 0,1 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBl. 199 Österreich 1984 |
| Laubwälder (gemessen an <i>Fagus sylvatica</i>) | NH ₃ | Tagesmittelwert (HMW) | 0,1 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBl. 199 Österreich 1984 |
| <i>Calluna vulgaris</i> | NH ₃ | Tagesmittelwert (HMW) | 0,27 mg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Van Eerden et al. (1991) |
| Pflanzen | SO ₂ | Minimalkonzentration, bei der akute Effekte auftreten können | 30ppb= 0,08 mg/m ³ | LOEC | Wellburn (1988) |
| Vegetation allg. | SO ₂ | akut phytotoxisch wirkende Konzentration | 70 ppb= 0,186 mg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Posthumus et al. (1991) |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | SO ₂ | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW) in den Monaten April bis Oktober | 0,07 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBl. 199 Österreich 1984 |
| Wälder auf extremen Standorten | SO ₂ | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,075 mg/m ³ | Leitwert | WHO (1987) |
| Pflanzen | SO ₂ | Halbstundenwert (HMW) | 30 ppb = 0,08 mg/m ³ | Richtwert, oberhalb dessen Schädigungen an Pflanzen auftreten können | Smidt (2010) |
| Mensch, Tiere, | SO ₂ | 95 Perzentil für den | 0,1 mg/m ³ | Grenzwert | Schweizerisches |

| Schutzgut | Schadstoff | Bezugszeit | Schwellenwert | Qualitätsmerkmal | Quelle |
|--|-----------------|---|---------------------------------|--|--|
| Pflanzen | | Halbstundenmittelwert (HMW) | | | Departement des Inneren (1985) |
| u.a. Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume | SO ₂ | 95 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,1 mg/m ³ | Grenzwert | Der Schweizerische Bundesrat 2015 |
| Laubwälder (gemessen an <i>Fagus sylvatica</i>) | SO ₂ | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,15 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | SO ₂ | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW) in den Monaten November bis März | 0,15 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| sehr empfindliche Pflanzen | SO ₂ | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,25 mg/m ³ | Empfehlung | SRU 1983 |
| empfindliche Pflanzen | SO ₂ | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,4 mg/m ³ | Empfehlung | SRU 1983 |
| weniger empfindliche Pflanzen | SO ₂ | 97,5 Perzentil für den Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,6 mg/m ³ | Empfehlung | SRU 1983 |
| Ökosysteme u. Vegetation | SO ₂ | Tagesmittelwert | 50 µg/m ³ | Zielwert | BGBI. 298 Österreich 2001 |
| Ökosysteme u. Vegetation außerhalb von Ballungsräumen und Hauptverkehrswegen | SO ₂ | Tagesmittelwert | 50 µg/m ³ | Zielwert | BGBI. 62 Österreich 2001 |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | SO ₂ | Tagesmittelwert (HMW) in den Monaten April bis Oktober | 50 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Pflanzen | SO ₂ | Tagesmittelwert | 20 ppb = 53,2 µg/m ³ | Richtwert, oberhalb dessen Schädigungen an Pflanzen auftreten können | Smidt (2010) |
| empfindliche Pflanzen | SO ₂ | Tagesmittelwert | 70 µg/m ³ | Empfehlung | UN/ECE (1988) |
| terrestrische Vegetation | SO ₂ | Tagesmittelwert | 100 µg/m ³ | Leitwert | WHO (1987) |
| u.a. Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume | SO ₂ | Tagesmittelwert | 100 µg/m ³ | Grenzwert | Der Schweizerische Bundesrat 2015 |
| u.a. Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume | SO ₂ | Tagesmittelwert | 100 µg/m ³ | Grenzwert | Liechtensteinisches Luftreinhaltegesetz 1987 |
| Laubwälder (gemessen an <i>Fagus sylvatica</i>) | SO ₂ | Tagesmittelwert (HMW) | 100 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | SO ₂ | Tagesmittelwert (HMW) in den Monaten November bis März | 100 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |

| Schutzgut | Schadstoff | Bezugszeit | Schwellenwert | Qualitätsmerkmal | Quelle |
|--|-----------------|--|---------------------------------|--|--|
| u.a. Vegetation | SO ₂ | Tagesmittelwert | 365 µg/m ³ | Qualitätsziel (CCC) | US-EPA (2000) |
| Vegetation allg. | HF | akut phytotoxisch wirkende Konzentration | 0,8-4,1 µg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Posthumus et al. (1991) |
| Pflanzen | HF | Minimalkonzentration, bei der akute Effekte auftreten können | 1 ppb= 0,8 µg/m ³ | LOEC | Wellburn (1988) |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | HF | Halbstundenmittelwert (HMW) in den Monaten April bis Oktober | 0,9 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | HF | Halbstundenmittelwert (HMW) in den Monaten November bis März | 4 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Laubwälder (gemessen an <i>Fagus sylvatica</i>) | HF | Halbstundenmittelwert (HMW) | 6 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | HF | Tagesmittelwert (HMW) in den Monaten April bis Oktober | 0,5 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| sehr empfindliche Pflanzen | HF | Tagesmittelwert | 1 µg/m ³ | VDI Richtlinie | 2310 Blatt 3 (2011) |
| sehr empfindliche Pflanzen | HF | Tagesmittelwert | 1,6 µg/m ³ | akzeptable Limits | McCune et al. (2002) |
| sehr empfindliche Pflanzen | HF | Tagesmittelwert | 2 µg/m ³ | Empfehlung | SRU 1983 |
| Mäßig empfindliche Pflanzen | HF | Tagesmittelwert | 2 µg/m ³ | VDI Richtlinie | 2310 Blatt3 (2011) |
| empfindliche Pflanzen | HF | Tagesmittelwert | 3 µg/m ³ | Empfehlung | SRU 1983 |
| Laubwälder (gemessen an <i>Fagus sylvatica</i>) | HF | Tagesmittelwert (HMW) | 3 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | HF | Tagesmittelwert (HMW) in den Monaten November bis März | 3 µg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| weniger empfindliche Pflanzen | HF | Tagesmittelwert | 4 µg/m ³ | Empfehlung | SRU 1983 |
| weniger empfindliche Pflanzen | HF | Tagesmittelwert | 7,5 µg/m ³ | VDI Richtlinie | 2310 Blatt 3 (2011) |
| weniger empfindliche Pflanzen | HF | Tagesmittelwert | 10,0 µg/m ³ | akzeptable Limits | McCune et al. (2002) |
| Süßwasser-Ökosysteme | HF | | 0,4-0,9 mg/l | PNEC, Predicted No Effect Concentration | EU - Institute for Health and Consumer Protection (2001) |
| Pflanzen | F | Jahresmittel | 0,3 µg/m ³ | Empfehlung | TA Luft (2002) |
| Vegetation allg. | Cl ₂ | akut phytotoxisch wirkende Konzentration | 100 ppb=0,147 mg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Posthumus et al. (1991) |
| Pflanzen | Cl ₂ | Minimalkonzentration, bei der akute Effekte auftreten können | 100 ppb=0,147 mg/m ³ | LOEC | Wellburn (1988) |

| Schutzgut | Schadstoff | Bezugszeit | Schwellenwert | Qualitätsmerkmal | Quelle |
|--|------------------|--|----------------------------------|--|---------------------------|
| Süßwasser-Ökosysteme | Cl ₂ | | 11 µg/l | Qualitätsziel (CCC) | US-EPA (1999) |
| Vegetation allg. | HCl | akut phytotoxisch wirkende Konzentration | 100 ppb=0,147 mg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Posthumus et al. (1991) |
| Pflanzen | HCl | Halbstunden-Mittelwert (HMW) | 260 ppb =0,383 mg/m ³ | Richtwert, oberhalb dessen Schädigungen an Pflanzen auftreten können | Smidt (2011) |
| Vegetation | HCl | Halbstunden-Mittelwert (HMW) | 0,4 mg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Neumüller (1979) |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | HCl | Halbstundenmittelwert (HMW) in den Monaten April bis Oktober | 0,4 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Laubwälder (gemessen an <i>Fagus sylvatica</i>) | HCl | Halbstundenmittelwert (HMW) | 0,6 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | HCl | Halbstundenmittelwert (HMW) in den Monaten November bis März | 0,6 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Vegetation | HCl | Tagesmittelwert (HMW) | 0,1 mg/m ³ | LOEC/LOEL (Lowest Observed Effect Concentration/Level) | Neumüller (1979) |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | HCl | Tagesmittelwert (HMW) in den Monaten April bis Oktober | 0,1 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Pflanzen | HCl | Tagesmittelwert (HMW) | 70 ppb = 0,103 mg/m ³ | Richtwert, oberhalb dessen Schädigungen an Pflanzen auftreten können | Smidt (2011) |
| Pflanzen | HCl | Minimalkonzentration, bei der akute Effekte auftreten können | 100 ppb=0,147 mg/m ³ | LOEC | Wellburn (1988) |
| Nadelwälder (gemessen an <i>Picea abies</i>) | HCl | Tagesmittelwert (HMW) in den Monaten November bis März | 0,15 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Laubwälder (gemessen an <i>Fagus sylvatica</i>) | HCl | Tagesmittelwert (HMW) | 0,2 mg/m ³ | Grenzwert (NOEC) | BGBI. 199 Österreich 1984 |
| Süßwasser-Ökosysteme | H ₂ S | | 2 µg/l | Qualitätsziel (CCC) | US-EPA (1999) |
| Pflanzen | H ₂ S | Minimalkonzentration, bei der akute Effekte auftreten können | 300 ppb=424 µg/m ³ | LOEC | Wellburn (1988) |
| Pflanzen | H ₂ S | Halbstunden- | 300 ppb= 424 | Richtwert, oberhalb | Smidt (2010) |

| Schutzgut | Schadstoff | Bezugszeit | Schwellenwert | Qualitätsmerkmal | Quelle |
|----------------------|-----------------------|------------------|--|--|---|
| | | Mittelwert (HMW) | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | dessen Schädigungen an Pflanzen auftreten können | |
| Pflanzen | H_2S | Tagesmittelwert | 30 ppb = 42,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Richtwert, oberhalb dessen Schädigungen an Pflanzen auftreten können | Smidt (2010) |
| Vegetation | CH_2O | Jahresmittel | 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Empfehlung | Österreichischen Akademie der Wissenschaften (1996) |
| Süßwasser-Ökosysteme | CH_2O | | 180 $\mu\text{g}/\text{l}$ | MTR (Maximal tolerierbares Risiko) | Janus u. Posthumus (2002) |

Anhang 2: Dokumentation der Literaturrecherche

Zur Thematik “Bewertung von Auswirkungen störfallbedingter Freisetzungen auf unter dem Gesichtspunkt des Naturschutzes besonders wertvolle bzw. besonders empfindliche Gebiete” wurden Literaturquellen nach folgenden Aspekten gesucht: Im Vordergrund stand die Suche nach derzeit aktuellen Quellen über die Umweltauswirkungen eines Störfalls mit den vorgegebenen gefährlichen Gasen in Bezug auf bestimmte Pflanzen und Lebensraumtypen. So sind vorrangig Publikationen ab dem Jahr 2000 bis 2016, teilweise ab 1985 und im geringen Teil von 1969 an in die Recherche einbezogen worden. Literaturquellen vor 1985 sind dann betrachtet worden, wenn es sich um die Originalquellen handelt, die in aktuellen Veröffentlichungen als Beleg für relevante Aussagen zitiert wurden. Die Durchsicht dieser später bestätigten originalen Quellen hatte den Vorteil, die genauen Randbedingungen von Feldversuchen in die Bewertung der Angaben in späteren Quellen berücksichtigen zu können.

In den folgenden Datenbanken wurde recherchiert:

| Name Datenbank | Bemerkung |
|---|---|
| Biological Abstracts | Thomson Reuters Web of Science research platform |
| BIOSIS | Kombiniert den Inhalt der Biological Abstracts, der Biological Abstracts / RRM (Reports, Reviews, Meetings) und BioResearch Index |
| Chemical Abstracts | CAS-Registry-Datenbank |
| ChemIDplus A TOXNET DATABASE | Medizinische Bibliothek der USA. Toxikologische Eigenschaften nur auf Menschen und Tiere bezogen. |
| Web of science | Thomson Reuters |
| TOXicology Data NETwork (= TOXNET) | Meta-Datenbank aus den Bereichen Toxikologie, Gefahrstoffe, Umweltschutz. Bietet Zugriff auf u.a.: HSDB, TOXLINE, ChemIDplus. |
| OPAC, ULIDAT, UFORDAT | Umweltbundesamt, Fachbibliothek Umwelt. |
| Deutsche Institut für Medizinische Dokumentation und Information (DIMDI) | 30 Datenbanken, u. a. BIOSIS Previews, EMBASE, EMBASE Alert, German Medical Science – Journals, German Medical Science – Meetings, MEDLINE, SciSearch |
| HU Berlin | Bibliothek |
| TU Berlin | Bibliothek |
| UBA Berlin | Bibliothek |
| Institut für Pflanzenbiologie der TU Braunschweig | Literaturdatenbank Vegetationsökologie |
| ZALF Müncheberg | Bibliothek |

Dabei wurde nach folgenden Begriffen gesucht:

| Chemisches Kürzel | Deutscher Name | Englischer Name | CSOID | CAS |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|--------------|------------|
| NH ₃ | Ammoniak | Ammonia | 0003893108 | 7664-41-7 |
| Cl | Chlor | Chlorine | 0003936514 | 7782-50-5 |
| HCl | Chlorwasserstoff | Hydrochloric acid | 0003886970 | 7647-01-0 |

| | | | | |
|-------------------|---------------------|-------------------------------------|------------|-----------|
| F | Fluor | Fluorine | 0003936459 | 7782-41-4 |
| HF | Fluorwasserstoff | Hydrofluoric acid | 0003893097 | 7664-39-3 |
| H ₂ CO | Formaldehyd | Formaldehyde | 0002427116 | 50-00-0 |
| SO ₂ | Schwefeldioxid | Sulfur dioxide auch sulphur dioxide | 0003810234 | 7446-09-5 |
| H ₂ S | Schwefelwasserstoff | Hydrogen sulfide | 0003937053 | 7783-06-4 |

in Verbindung mit folgenden Arten bzw. Vegetationstypen:

Arrhenatherum elatius, Glatthafer, oatgrass
 Calluna vulgaris, Heidekraut, heath
 Carex sp., Seggen, Sauergräser, sedge
 Fagus sylvatica, Buche, Rotbuche, beech
 Maianthemum bifolium, Schattenblume, may flower
 Molinia caerulea, Pfeifengras, purple moor grass
 Ranunculus flammula, Brennender Hahnenfuß, spearwort
 Tragopogon pratense, Wiesen-Bochsart,
 Chara spec., Armleuchteralgen
 Luzulo-Fagetum, Hainsimsen-Buchenwald, beech wood
 Arrhenatheretum, artenreiche Wiesen, mesotrophic grassland
 Caricetum nigrae, Caricetum fuscae, bodensaure(s) Flachmoor(e), Niedermoor(e), acidic fen
 Oligotrophe kalkhaltige Gewässer, mesotrophe kalkhaltige Gewässer, Chara-See, oligotrophic calcareous waters, mesotrophic calcareous waters, Chara waters
 trockene Heide, Calluna-Heide, heath, dry heath

Als Ergebnis der Abfrage der Datenbanken ChemIDplus, HSDB und Toxline sowie ECOTOX (US EPA) und ETOX (UBA) hat sich ergeben:

ja = Angaben vorhanden

k.A.= keine Angaben vorhanden

| Chemisches Kürzel | CAS | Schwellenwert, Qualitätsziel | Test | vorhandene Angaben in: |
|-------------------|-----------|------------------------------|------|---------------------------|
| NH ₃ | 7664-41-7 | k.A. | ja | ETOX UBA |
| Cl | 7782-50-5 | ja | k.A. | ETOX UBA, ECOTOX (US EPA) |
| HCl | 7647-01-0 | k.A. | k.A. | |
| F | 7782-41-4 | ja | ja | ETOX UBA |
| HF | 7664-39-3 | ja | k.A. | ETOX UBA |
| H ₂ CO | 50-00-0 | ja | ja | ETOX UBA |
| SO ₂ | 7446-09-5 | ja | k.A. | ECOTOX (US EPA) |
| H ₂ S | 7783-06-4 | ja | k.A. | ETOX UBA, ECOTOX (US EPA) |

Die Auswertung der themenrelevanten Fachliteratur in den Bibliotheken des Umweltbundesamtes, der TU Berlin, der Humboldt-Universität Berlin und des Zentrums für Agrar-Landschaftsforschung (ZALF) in Müncheberg sowie die Suche anhand der gegebenen Stichworte im World Wide Web ergab 87 themenbezogen relevante Literaturquellen. Die Recherche wurde ausgeweitet anhand der Verweise innerhalb einer Quelle auf weiterführende Literatur. Diese wurde über Fernleihe besorgt. Die Suche wurde abgebrochen, als in weiteren Literaturstellen nur noch Bezug auf bereits ausgewertete Quellen genommen wurde.

Als Dokumententyp wurden insbesondere Veröffentlichungen zu Forschungsvorhaben von Instituten und Fachbehörden, Studien, Artikel in Fachzeitschriften, Gesetze, Verordnungen

und Richtlinien des deutschen, europäischen und nordamerikanischen Rechts, Tagungsbeiträge, Jahresberichte sowie Bücher ausgewertet. Die recherchierte Literatur stammt vorrangig aus dem mitteleuropäischen Raum und den USA.