

Ammoniac dans les étables de bétail bovin: évolution des émissions en Suisse

Sabine Schrade et Margret Keck,

Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8356 Ettenhausen

Renseignements: Sabine Schrade, e-mail: sabine.schrade@art.admin.ch, tél. +41 52 368 33 33



Les facteurs d'émissions de NH_3 ont été calculés pour le mode de détention le plus fréquent des vaches laitières en Suisse, à savoir la stabulation libre à logettes avec aires de circulation en dur et aire d'exercice extérieure, à partir de mesures pratiques et d'une large base de données. (Photo: ART)

Introduction

Situation initiale et objectif

Les simulations indiquent que les émissions d'ammoniac (NH_3) en Suisse en 2007 provenaient à environ 94 % de l'agriculture, dont près de 34 % de la stabulation des animaux de rente. Le bétail bovin est responsable de la majeure partie des émissions de NH_3 avec un pourcentage de 79 % (Achermann *et al.* 2009). Jusqu'à présent, on ne disposait pas de facteurs d'émissions de NH_3 pour les systèmes de stabulation avec aire d'exercice extérieure, très répandus en Suisse. Le but de cette étude

était de déterminer les facteurs d'émissions de NH_3 avec le type de stabulation libre le plus fréquent pour les vaches laitières en Suisse, à savoir la stabulation libre à logettes avec aération naturelle, surfaces de circulation en dur et aire d'exercice extérieure latérale (Schrade *et al.* 2011). Il s'agissait en outre de suivre l'évolution de NH_3 provenant des stabulations bovines de 1990 à 2008 en extrapolant jusqu'en 2020.

Facteurs d'émissions

Pour l'inventaire, les émissions sont calculées à partir des données d'activité et des facteurs d'émission (Döhler *et al.* 2002; AEE 2009). Les données d'activité décrivent la diffusion ou la fréquence d'un système comme le nombre d'animaux dans un système de stabulation par unité temporelle (Menzi *et al.* 2008). Un facteur d'émission représente une émission pour une catégorie ou un système donnés (p. ex. système de production, système de détention) sur l'année (VDI 2011). Les émissions de la détention d'animaux de rente sont réparties en catégories, en fonction de la catégorie animale, du mode d'alimentation, du type d'engrais de ferme, du système de stabulation ou de la combinaison de ces différents éléments (Hutchings *et al.* 2001; Döhler *et al.* 2002; AEE 2007; Menzi *et al.* 2008). Le degré de détails de chaque catégorie devrait correspondre à son importance. Par manque de données systématiques, les facteurs d'émissions ont souvent été déterminés jusqu'ici par convention à partir de mesures, de données tirées de la littérature, de considérations de plausibilité et d'expériences pratiques (VDI 2011). Pour pouvoir établir des modèles de facteurs d'émissions fiables, il est nécessaire d'avoir des valeurs d'émissions solides et détaillées, une base de données complète avec des paramètres pertinents, à large portée spatiale et temporelle.

Matériel et méthodes

L'évolution des émissions de NH_3 pour les années 1990, 1995, 2000 et 2005 ainsi que l'extrapolation jusqu'en 2020 a été calculée à partir des facteurs d'émissions de NH_3 , des effectifs animaux et de la répartition des systèmes de stabulation. Pour ce faire, des facteurs d'émis-

sion ont été simulés pour la stabulation libre avec aire d'exercice extérieure à partir d'une large base de données. Les facteurs d'émissions pour la stabulation entravée sont tirés de la littérature.

Facteurs d'émissions, stabulation libre à logette avec aire d'exercice extérieure

Les mesures systématiques effectuées avec la méthode Tracer-Ratio dans six exploitations de vaches laitières (Schrade *et al.* 2012) ont servi de base pour simuler les facteurs d'émissions de NH_3 dans les stabulations libres à logettes avec aération naturelle, surfaces de circulation en dur et aire d'exercice extérieure latérale. Un modèle linéaire à effets mixtes a montré que les facteurs d'influence significatifs pour les émissions de NH_3 étaient la température extérieure ($F_{1,1053} = 100,7836$; $p < 0,001$), la vitesse du vent dans l'étable ($F_{1,1053} = 99,4947$; $p < 0,001$) et la teneur en urée du lait stocké dans le tank ($F_{1,5} = 6,9097$; $p = 0,046$) (Schrade *et al.* 2012). Les facteurs d'émission ont été déduits de ce modèle statistique à partir d'une estimation ponctuelle avec éléments de variance échelonnés. La base de données qui a servi à ce calcul a été constituée à partir des taux d'urée utilisés comme indicateur des excréments d'azote, provenant des données de contrôle du lait des fédérations des races de vaches brune, tachetée rouge et de Holstein sur cinq ans, différenciées entre région de plaine et région de montagne (fig. 1). D'autre part, le modèle s'appuie sur les températures relevées dans 43 stations météorologiques de l'Office fédéral de la météorologie et de la climatologie MétéoSuisse à deux niveaux d'altitude (région de plaine et région de montagne).

Résumé

Des calculs ont été faits pour estimer les émissions d'ammoniac (NH_3) issues de la production bovine de 1990 à 2020. Ils reposent sur les effectifs annuels de bétail, la répartition des systèmes de stabulation et les facteurs d'émissions de NH_3 . Les facteurs d'émission des stabulations libres avec aire d'exercice extérieure ont été obtenus à partir d'un calcul basé sur des mesures d'émissions dans six étables de vaches laitières, sur les teneurs d'urée du lait, les températures ainsi que les vitesses typiques du vent. Les facteurs d'émission de NH_3 issus de la simulation variaient de 22 à 25 g par unité gros bétail (UGB) et par jour (d). Pour la stabulation entravée, le facteur d'émission de NH_3 de 16,4 g UGB⁻¹ d⁻¹ est tiré de la littérature scientifique.

De 1990 à 2000, les émissions de NH_3 ont légèrement reculé dans un premier temps, avant de réaugmenter en 2005. Dans l'hypothèse d'une stabilisation de l'effectif animal au niveau de 2008, on estime que les émissions de NH_3 enregistreront une augmentation de 4 à 12 % entre 1990 et 2020. La présence de plus en plus fréquente de stabulations libres avec des surfaces souillées plus importantes est en partie à l'origine de cette situation.

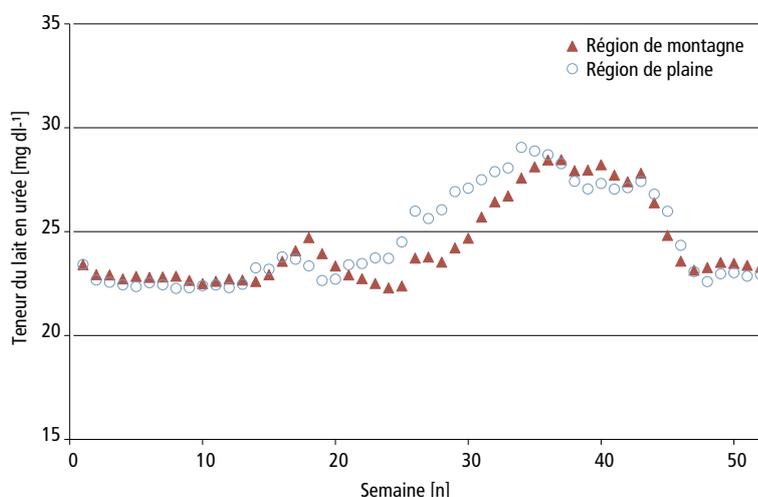


Figure 1 | Evolution des teneurs en urée [mg dl^{-1}] indiquées sous forme de moyenne par semaine, calculées à partir des valeurs de vaches individuelles et cumulées par région (région de plaine et de montagne) comme base pour la simulation des facteurs d'émissions de NH_3 .

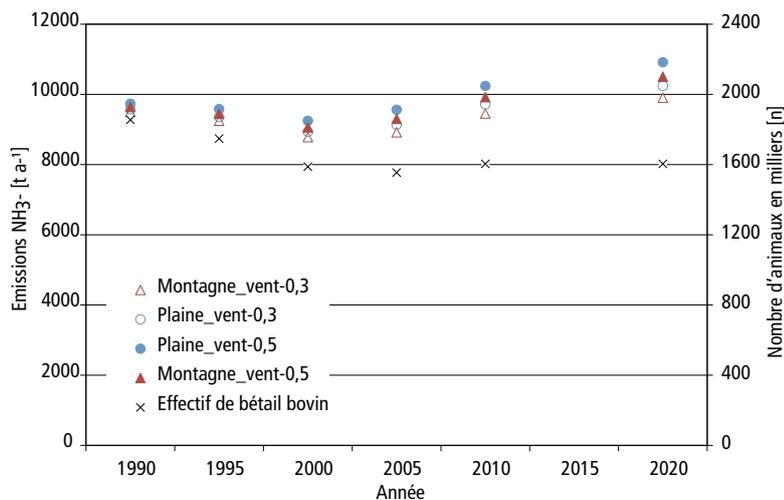


Figure 2 | Evolution du cheptel bovin [n] et des émissions de NH_3 [t a^{-1}] issues de la détention de bétail bovin en Suisse de 1990 à 2020.

Des valeurs horaires moyennes sur une journée par semaine enregistrées durant les années 2004 à 2008 ont permis de paramétrer les fluctuations horaires des valeurs d'émission dans le modèle statistique. Cette base de données détaillée des teneurs en urée du lait et des températures a permis de représenter les fluctuations typiques sur cinq années. Pour prendre en compte l'effet de la vitesse du vent dans l'étable, deux vitesses différentes $0,3 \text{ m s}^{-1}$ (vent-0,3) et $0,5 \text{ m s}^{-1}$ (vent-0,5) ont été choisies, à partir de mesures propres et des données figurant dans la littérature. L'établissement du modèle est décrit en détails par Schrade *et al.* (2012).

Facteur d'émission stabulation entravée

Pour la stabulation entravée, le facteur d'émission de NH_3 est tiré de quatre essais relatés dans la littérature. Les mesures d'Amon *et al.* (1999), de Groot Koerkamp et Uenk (1997) ainsi que celles de Gustafsson *et al.* (2001) couvrent largement l'échelle des variations saisonnières, tandis que les essais de Groenestein (1993) ne comportent pas de mesures réalisées dans des conditions très chaudes. Les données d'émissions varient entre $5 \text{ g UGB}^{-1}\text{d}^{-1}$ (Amon *et al.* 1999) et $26 \text{ g UGB}^{-1}\text{d}^{-1}$ (Gustafsson *et al.* 2001). Le facteur d'émission a été défini comme la médiane des résultats des différents auteurs. Etant donné le manque de documentation dans la littérature, il n'a pas été possible de différencier en fonction de l'approvisionnement des animaux en azote, de l'altitude et de la vitesse de l'air dans l'étable comme on l'avait fait pour les facteurs d'émission dans la stabulation libre.

Evolution du cheptel bovin

De 1990 à 2004, le cheptel bovin a généralement baissé. Il a de nouveau augmenté de 2005 à 2008 pour se stabi-

liser durant les années suivantes (Union suisse des paysans 1991–2011; fig. 2). Le calcul des émissions pour les années 2010 et 2020 postule une stabilisation des effectifs animaux au niveau de 2008.

Evolution des systèmes de stabulation

Schrade *et al.* (2011) ont décrit la répartition actuelle et future des systèmes de stabulations libre et entravée pour les différentes catégories de bovins à partir des statistiques de l'Union suisse des paysans, du taux de participation aux éthoprogrammes, ainsi que d'une expertise réalisée à cet effet. Dans l'élevage de vaches laitières, les stabulations entravées dominent encore pour l'instant. Toutes catégories animales confondues, la tendance est toutefois aux stabulations libres. Tandis qu'en 1990, le pourcentage de vaches laitières détenues en stabulations libres n'était encore que de 10 %, en 2010 ce sont près de 40 % de vaches laitières qui sont détenues de la sorte. D'après les relevés statistiques, il n'est pas possible de différencier les systèmes de détention de manière plus détaillée par exemple, selon l'aménagement des aires de repos et de circulation, l'offre de fourrage, la disposition des aires fonctionnelles, l'utilisation des aires d'exercice extérieures dans le temps, le mode et la fréquence de l'évacuation du fumier.

Calcul des émissions

Le calcul des émissions pour chaque année repose d'abord sur le calcul du nombre d'animaux par catégorie, différencié entre stabulation libre et stabulation entravée. Comme il n'existe pas de données détaillées sur les émissions pour les catégories jeune bétail d'élevage et de rente, vaches-nourrices et vaches-mères ainsi que pour le gros bétail et les veaux d'engraissement, une

Tabl. 1 | Emissions de NH₃ [g UGB⁻¹ d⁻¹] en stabulation entravée pour vaches laitières selon les auteurs, médiane de ces données

Source	Emissions de NH ₃ [g UGB ⁻¹ d ⁻¹]	Portée des relevés; Détermination du volume d'échange d'air	Température de l'étable [°C] (moyenne arithm., minimum–maximum)
Amon <i>et al.</i> 1999 (AT)	5,0	5 x système de lisier (à raison de 6–15 d) 4 x système de fumier solide (à raison de 7–11 d); Ventilateur de mesure	4 saisons
Groenestein 1993 (NL)	13,3	2 mesures: hiver, printemps; Ventilateur de mesure	16,9 (15,4–19,2)
Groot Koerkamp u. Uenk 1997 (NL)	19,5	Mesures en été et en hiver à raison de 4 x 24 h; Bilan du CO ₂	14,6 (9–19)
Gustafsson <i>et al.</i> 2001 (SE)	26,4	Mesures sur 10 mois; Ventilateur de mesure	16,9 (14,9–19,3)
Médiane	16,4	--	--

valeur composée a été établie pour chaque année civile pour toutes les catégories de bovins (valeur composée UGB). Pour chaque système de stabulation, les effectifs animaux de toutes les catégories de bovins ont été additionnés, puis multipliés par la valeur composée UGB et le facteur d'émission du système de stabulation correspondant pour 365 jours. Ce calcul prend en compte les quatre variantes suivantes de stabulation libre Plaine_vent-0,3, Plaine_vent-0,5, Montagne_vent-0,3 et Montagne_vent-0,5.

Résultats et discussion

Facteurs d'émission

La base de données qui a servi à déduire le facteur d'émission du système de stabulation libre à logettes avec surfaces de circulation en dur et aire d'exercice extérieure latérale est très vaste. Elle comprend outre les mesures systématiques effectuées dans six exploitations à des saisons différentes, des teneurs détaillées du lait en urée et des relevés de températures. Par conséquent, les facteurs d'émissions de NH₃ reflètent les différences climatiques régionales et les différences de niveau d'affouragement. Ils tiennent également

compte de l'influence du vent. Dans le tableau 2, les facteurs d'émission de NH₃ sont indiqués sous forme de moyenne arithmétique avec un intervalle de confiance de 95 %. Quelle que soit la variante considérée, le facteur moyen d'émission de NH₃ pour la détention de vaches laitières en stabulation libre à logettes avec aération naturelle, surfaces de circulation en dur et aire d'exercice extérieure latérale oscille entre 21,8 g et 24,5 g UGB⁻¹ d⁻¹ respectivement 28,9 et 32,6 g animal⁻¹ d⁻¹. La valeur de référence est une unité gros bétail d'un poids vif de 500 kg, respectivement un animal d'un poids vif de 650 kg. Le facteur d'émission de NH₃ pour la région de plaine est plus élevé que celui de la région de montagne du fait des températures plus élevées pour une vitesse de vent équivalente. Au sein de la même zone d'altitude, le facteur d'émission correspondant à une vitesse de vent plus élevée est plus important que si la vitesse de vent est inférieure. Les différences entre les variantes sont minimes. Les facteurs d'émissions simulés sont plus bas que le facteur d'émission de NH₃ pour la stabulation libre à logettes en Allemagne avec 40 g place animale⁻¹ d⁻¹ (Döhler *et al.* 2002) et pour la stabulation avec aire d'exercice extérieure au Portugal qui affiche 86 g UGB⁻¹ d⁻¹ (Pereira *et al.* 2010). ➤

Tabl. 2 | Facteurs d'émission de NH₃ pour la détention de vaches laitières en stabulation libre à logettes avec aération naturelle, surfaces de circulation en dur et aire d'exercice extérieure latérale à partir de la simulation pour les deux sites région de montagne et région de plaine, ainsi que pour les deux vitesses de vent (UGB unité gros bétail; 1 UGB = 500 kg de poids vif).

Variante: Région et vitesse du vent [m s ⁻¹]	Facteur d'émission de NH ₃ Moyenne arithm. (intervalle de confiance de 95-%)	
	[g animal ⁻¹ d ⁻¹]	[g UGB ⁻¹ d ⁻¹]
Montagne_vent-0,3	28,9 (16,4; 49,9)	21,8 (12,3; 37,5)
Montagne_vent-0,5	31,1 (17,4; 52,9)	23,4 (13,0; 39,8)
Plaine_vent-0,3	30,1 (16,0; 50,4)	22,7 (12,0; 37,9)
Plaine_vent-0,5	32,6 (17,8; 54,0)	24,5 (13,4; 40,6)

Avec $16,4 \text{ g UGB}^{-1} \text{ d}^{-1}$, respectivement $21,8$, le facteur d'émission de NH_3 de la stabulation entravée est légèrement plus élevé que la valeur de Döhler *et al.* (2002) avec $13,4 \text{ g place animale}^{-1} \text{ d}^{-1}$ et nettement plus bas que les facteurs d'émission calculés par modélisation pour la stabulation libre. Le facteur d'émission de l'Agence européenne pour l'environnement (2007) est une valeur composée pour les stabulations libre et entravée et s'élève à $24 \text{ g animal}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Par conséquent, il est légèrement plus élevé que le facteur d'émission de la stabulation entravée qui a été tiré de la littérature, mais toutefois nettement en dessous des facteurs d'émission calculés par modélisation.

Calcul des émissions de NH_3 provenant des stabulations

Le calcul des émissions de NH_3 repose largement sur les données disponibles et indique clairement les tendances de l'évolution passée et future. Les incertitudes suivantes subsistent néanmoins du fait de la base de données insuffisante:

- Comme les hypothèses relatives à la diffusion des systèmes de stabulation reposent sur des données de littérature ponctuelles et des valeurs d'estimation, la différenciation entre stabulation libre et stabulation entravée ne peut être que grossière.
- Les valeurs d'émissions de NH_3 pour la stabulation entravée tirées de la littérature ont une amplitude de variation très grande. De plus, il manque des données sur la stabulation entravée avec aire d'exercice extérieure.
- Les calculs ne prennent pas en compte l'alpage et le pâturage. En effet, on ne dispose de données sur la fréquence et la durée des séjours à l'alpage et au pâturage que pour certaines années et, d'autre part, les données d'émissions font totalement défaut. Il n'est pas clair comment le niveau d'émission varie dans l'étable en cas de pâturage intégral, en demi-journées ou en journées complètes. Enfin, les calculs ne comprennent pas non plus les émissions issues du stockage des engrais de ferme.
- Etant donné l'absence de facteurs d'émissions pour le jeune bétail d'élevage et de rente, pour le gros bétail et les veaux d'engraissement, ainsi que pour les vaches-nourrices et vaches-mères, les valeurs d'émissions des vaches laitières ont été appliquées à toutes les catégories et une valeur composée UGB a été admise pour toutes les catégories.
- Dans l'hypothèse que les effectifs animaux se stabilisent au niveau de 2008, les conditions cadres politiques ainsi que les autres facteurs qui pourraient influencer l'évolution du cheptel n'ont pas été pris en compte.

Entre 1990 à 2000, quelle que soit la variante considérée, les émissions affichent une tendance à la baisse. En cas de stabilisation de l'effectif animal au niveau de 2008, les émissions augmenteraient considérablement jusqu'en 2020. L'augmentation du pourcentage d'animaux détenus en stabulation libre joue un rôle déterminant de ce point de vue. Tandis qu'en 1990, les différences entre les émissions de NH_3 des quatre variantes étaient minimes, elles se sont creusées au fil des ans du fait de l'importance croissante de la stabulation libre. En 2020, les émissions de NH_3 de la variante Plaine_vent-0,3 s'élèvent à $10\,900 \text{ t a}^{-1}$, soit 1000 t a^{-1} de plus que celles de la variante Montagne_vent-0,3 qui se montent à 9900 t a^{-1} . Dans l'hypothèse d'un effectif bovin constant, l'augmentation des émissions provient uniquement des modifications des systèmes de stabulation.

Conclusions

Le modèle décrit a permis de déterminer les facteurs d'émission de NH_3 pour les stabulations libres avec surfaces de circulation en dur et aires d'exercice extérieures grâce à une large base de données, garantissant une vaste portée spatiale et temporelle et une approche différenciée par région. Il serait souhaitable d'affiner encore la différenciation des facteurs d'émission de manière à tenir compte de l'aménagement des surfaces de circulation et de la détention au pâturage.

En dépit des incertitudes qui caractérisent le calcul des émissions, des tendances nettes se dessinent quant à l'évolution passée et future. Le recul du cheptel bovin entre 1990 et 2000 n'a pas entraîné une baisse équivalente des émissions de NH_3 . Ceci est dû à l'augmentation des stabulations libres avec aires d'exercice extérieures et donc de la superficie des surfaces souillées. De 2004 à 2008, le cheptel bovin a de nouveau légèrement augmenté pour se stabiliser au niveau de l'année 2008. Un accroissement des stabulations libres laisse supposer une augmentation supplémentaire des émissions de NH_3 . Il est nécessaire d'agir pour limiter les émissions de NH_3 . Pour ce faire, il faut développer des mesures pratiques de réduction de NH_3 sur le plan organisationnel et technique et du point de vue de la construction, les quantifier et les mettre en pratique. ■

Remerciements

Ce projet a été cofinancé par l'Office fédéral de l'environnement OFEV.

Riassunto

Ammoniaca dalle stalle per il bestiame bovino: evoluzione delle emissioni in Svizzera

Per calcolare le emissioni di ammoniaca (NH_3) provocate dai sistemi di stabulazione per il bestiame bovino per il periodo 1990–2020 sono stati utilizzati i dati annuali sugli animali, quelli sulla diffusione dei sistemi di stabulazione e i coefficienti di emissione di NH_3 . Questi ultimi, per i sistemi a stabulazione libera con corte, sono stati fissati attraverso un calcolo su modelli basati sulle misurazioni delle emissioni di sei stalle per il bestiame da latte, sui tenori di urea nel latte, sulle temperature e sulla velocità del vento tipica. I calcoli su modelli hanno dato valori variabili da 22 a 25 grammi per unità di bestiame grosso (UBG) e giorno (d). Per i sistemi a stabulazione fissa, dai dati reperiti dalla bibliografia è stato stabilito un coefficiente di emissione di NH_3 pari a $16,4 \text{ g UBG}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Dal 1990 al 2000 le emissioni di NH_3 hanno segnato una lieve diminuzione, per poi aumentare nuovamente nel 2005. Con una stagnazione del numero di animali al livello del 2008, per il 2020 ci si attende un aumento delle emissioni di NH_3 pari al 4–12 per cento rispetto al 1990, riconducibile alla maggiore diffusione dei sistemi a stabulazione libera con superfici sporche più estese.

Bibliographie

- Achermann B., Bonjour C., Kupper T., Leuenberger C., Menzi H., Nyfeler-Brunner A., Rihm B. & Zaucker F., 2009. Ammoniakemissionen in der Schweiz: Neuberechnung 1990–2007. In: Fachtagung Ammoniak- und Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft: Inventare und Programme zu deren Minderung, 10 September 2009, Zollikofen, Bern, 70.
- Amon B., Amon T. & Boxberger J., 1999. Emissionen von NH_3 , N_2O und CH_4 aus der Festmistverfahrens-kette Milchviehanbindehaltung Stall-Lagerung-Ausbringung. Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung – Beiträge zur 4. Internationalen Tagung von 9. und 10. März 2003 in München-Weihenstephan, 57–62.
- Döhler H., Eurich-Menden B., Dämmgen U., Osterburg B., Lüttich M., Bergschmidt A., Berg W. & Brunsch R., 2002. BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der Deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahr 2010. Umweltbundesamt Texte 05/02 B 55050, 192.
- European Environment Agency (EEA), 2007. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook 2007.
- Groenestein C. M., 1993. Animal-waste management and emission of ammonia from livestock housing systems: field studies. Livestock Environment IV: Fourth International Symposium University of Warwick Coventry, England, 1169–1175.
- Groot Koerkamp P. W. G. & Uenk G. H., 1997. Climatic Conditions and Aerial Pollutants in and Emissions from Commercial Animal Production Systems in the Netherlands. In: Voermans J.A.M. and Monteny G.J., Ammonia and Odour Emissions From Animal Production Facilities. Proceedings of a International Symposium in Vinkeloord, Netherlands, 139–144.

Summary

Ammonia from cattle housing systems: development of emissions in Switzerland

Annual livestock numbers, the distribution of livestock housing systems and NH_3 emission factors were used to calculate ammonia emissions (NH_3) from cattle farming for the years 1990 to 2020. Emission factors for loose housing with outdoor exercise areas were computed using a model-based calculation based on emission measurements from six dairy housing systems, milk urea levels, temperatures and typical wind speeds. The NH_3 emission factors modelled varied from 22 to 25 g per livestock unit (LU) per day (d). An NH_3 emission factor of $16.4 \text{ g LU}^{-1} \text{ d}^{-1}$ for the tied housing system was derived from literature data. From 1990 to 2000 NH_3 emissions were initially slightly down, whereas they had increased again by 2005. If livestock numbers stagnate at the 2008 level, NH_3 emissions of 4 to 12 % higher than in 1990 are anticipated for 2020. This is because of the more widespread distribution of loose housing with larger soiled surfaces.

Key words: emission factor, ammonia, modeling, dairy cattle, calculation.

- Gustafsson G., Hultgren J. & Jeppsson K.-H., 2001. Ammonia emissions from the cowshed, and animal cleanliness, reproductive performance and health – reference measurements. In: *Life Ammonia Feb* (5).
- Hutchings N. J., Sommer S. G., Andersen J. M. & Asman W. A. H., 2001. A detailed ammonia emission inventory for Denmark. *Atmospheric Environment* 35, 1959–1968.
- Menzi H., Kupper T. & Reidy B., 2008. Emissionsinventar für Ammoniak basierend auf einer repräsentativen Umfrage zur landwirtschaftlichen Produktionstechnik. Effiziente Nutzung von Grünland als Ressource für die Milch- und Fleischproduktion, 28.–30. August 2008, Zollikofen, Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau 9, 59–62.
- Pereira J., Misselbrook T. H., Chadwick D., Coutinho J. & Trindade H., 2010. Ammonia emissions from naturally ventilated dairy cattle buildings and outdoor concrete yards in Portugal. *Atmospheric Environment* 44, 3413–3421.
- Schrade S., Keck M., Zeyer K. & Emmenegger L., 2011. Systèmes de détection et concept de mesure émissions d'ammoniac en cas d'aération naturelle. *Recherche Agronomique Suisse* 2 (4), 170–175.
- Schrade S., Zeyer K., Gygax L., Emmenegger L., Hartung E. & Keck M., 2012. Ammonia emissions and emission factors of naturally ventilated dairy housing with solid floors and an outdoor exercise area in Switzerland. *Atmospheric Environment* 47, 183–194.
- Schweizerischer Bauernverband 1991–2011: Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. Diverse Jahrgänge. Brugg.
- VDI 2011. VDI-Richtlinie 3894 Blatt 1: Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen – Haltungsverfahren und Emissionen Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde. VDI, 1–84.