

Deposition fra fladekilder og lave punktkilder i relation til OML og VVM

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 20. oktober 2020 | **76**



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Kategori: Rådgivningsnotat

Titel: Deposition fra fladekilder og lave punktkilder i relation til OML og VVM

Forfatter: Per Løfstrøm

Institution: Aarhus Universitet, DCE – Institut for Miljøvidenskab

Faglig kommentering: Lise Marie Frohn
Kvalitetssikring, DCE: Vibeke Vestergaard Nielsen

Ekstern kommentering: Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her: [Kommenteringsskema deposition fra fladekilder og lave punktkilder_76](#)

Rekvirent: Miljøstyrelsen

Bedes citeret: Per Løfstrøm. 2020. Deposition fra fladekilder og lave punktkilder i relation til OML og VVM. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 27 s. -- Fagligt notat nr. 2020|76
https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notatet_2020/N2020_76.pdf

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Sideantal: 27

Indhold

1	Indledning	4
2	Beregningsmetoder for deposition i relation til OML	5
2.1	Generelt om deposition	5
2.2	Beregningsmetoder for OML-DEP og OML-Multi	5
2.2.1	Våd- og tørdeposition	5
2.2.2	Meteorologiske data	5
2.2.3	Emission	6
2.2.4	Algoritme for tørdeposition	6
2.3	Beregningseksempel	7
2.3.1	Opstrøms dræn af ammoniak	7
2.3.2	Effektiv depositions hastighed	8
2.3.3	Meteorologiske data	10
2.4	Deposition til græs og vand	10
2.5	Koncentrationsforskel mellem fladekilde og punktkilder	11
2.6	Sammenfatning om forskelle i deposition til skov	12
3	Forbedrede depositions beregninger	13
3.1	Lave punktkilder	14
3.1.1	Anvendelse af staldberegninger for husdyrbrug	14
3.1.2	Ny meteorologi og korrigeret depositions hastighed i VVM-metoden	15
3.1.3	Meteorologiske data	15
3.1.4	Depositions hastighed i nærområdet	16
3.1.5	Depositions hastighed korrigeret for deposition i oplandet	16
3.2	Betydning af døgnrytme i emissionen	18
3.3	Fladekilder	18
3.4	Konkrete beregninger for flere naturpunkter	19
4	VVM metoden for NO, NO₂ og N₂O	20
4.1	Afstandskorrektion for lave kilder og andre stoffer	21
5	VVM og høje punktkilder	23
6	Sammenfatning af anbefaling for anvendelse af VVM-metoden	24
6.1	For bestemmelse af korrigeret depositions hastighed for andre stoffer	25
6.2	Meteorologiske data	25
7	Referencer	26

1 Indledning

Miljøstyrelsen (MST), Miljø og Fødevareministeriet har bedt DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet (AU) om at udarbejde et notat, som redegør for forskellen på beregningen af deposition af ammoniak fra lave punktkilder, når beregningen foretages med MST's IT-system i husdyrgodkendelser.dk, som er baseret på OML-DEP, og med AU's model OML-Multi med anvendelse af VVM-metoden beskrevet i DCE's notat af 28. januar 2014. VVM-metoden beregner større depositioner end IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk. Denne forskel forstærkes yderligere, når IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk sammenlignes med VVM-beregning for en fladekilde. Derudover ønskes beskrivelse og anbefaling af en beregningsmetode for deposition af ammoniak fra fladekilder ved anvendelse af OML-Multi. Opgaven er udført af Institut for Miljøvidenskab (ENVS).

Den version af OML-Multi, som er anvendt i DCE-notatet fra 2014, er version 6.0. De nyere versioner 6.2 og 7.0 udfører de samme beregninger. Med version 7.0 fra august 2020 er der mulighed for også at udføre lidt simplificerede depositionsregninger for ammoniak fra stalde med husdyr i lighed med OML-DEP.

Kapitel 2 beskriver først de fundamentale forskelle mellem beregningsmetoderne for deposition af ammoniak mellem OML (VVM-metoden) og OML-DEP. Der gives eksempel på beregningsforskellen dels for en lav punktkilde og en fladekilde.

I kapitel 3 beskrives to metoder for et tilnærmet estimat af deposition af ammoniak fra fladekilder (arealkilder) med anvendelse af OML. Den første benytter OML-Multi 7.0's beregning af ammoniakdeposition fra stalde, når kilden opfylder visse betingelser. Den anden metode benytter sig af OML's VVM-metode men med anvendelse af korrigerede depositions-hastigheder i forhold til DCE-notat fra 2014.

I kapitel 4 vurderes muligheden for at overføre den korrigerede VVM-metode til deposition af andre stoffer.

Kapitel 5 undersøger muligheden for anvendelse af metode nummer to (OML's VVM-metode) på høje punktkilder, idet korrektionen af depositions-hastigheder vil være forskellig for høje og lave kilder.

2 Beregningsmetoder for deposition i relation til OML

2.1 Generelt om deposition

Helt generelt kan deposition af gasser og partikler opdeles to processer: Tørdeposition og våddeposition.

Tørdeposition af et stof foregår, når stoffet bringes i direkte kontakt med en overflade, som fx kan være vandoverflader, jord eller vegetation. Forskellige stoffer hæfter til overfladen med forskellig effektivitet. Når stoffet er afsat, vil det bidrage til, at luftkoncentrationen aftager nedstrøms og raten for afsætning vil falde. Hastigheden hvormed stoffet afsættes, tørdepositions-hastigheden, afhænger af blandt andet typen af overflade, tidspunktet, meteorologiske forhold, stoffets egenskaber og for partikler desuden størrelsen.

Våddeposition optræder under nedbør. Her udvasker nedbøren stofferne fra luften (røgfanen). Processen afhænger derfor ikke af jordoverfladens beskaffenhed. Raten for udvaskning på et givet tidspunkt afhænger blandt andet af stofkoncentrationen (i røgfanen), intensiteten af nedbøren og stofegenskaberne.

Tør- og våddeposition kan optræde på samme tid, men vil gensidigt begrænse hinanden.

2.2 Beregningsmetoder for OML-DEP og OML-Multi

I det følgende beskrives de centrale forskelle i beregningen af deposition af ammoniak mellem MST's IT-system i husdyrgoodkendelser.dk (*Geels et al., 2006; Løfstrøm, 2010*), der er baseret på beregninger med OML-DEP (*Ellermann et al., 2006; Sommer et al., 2009*), og OML (VVM-metoden) (*Løfstrøm, 2014*) som er baseret på OML (*Olesen et al., 2007*).

2.2.1 Våd- og tørdeposition

OML-DEP beregner udelukkende tørdeposition, idet modellen fokuserer på nærområdet omkring stalde med husdyrproduktion.

OML (VVM-metoden) inddrager også våddepositionen og antager konservativt, at tør- og våddepositionen ikke påvirker hinanden.

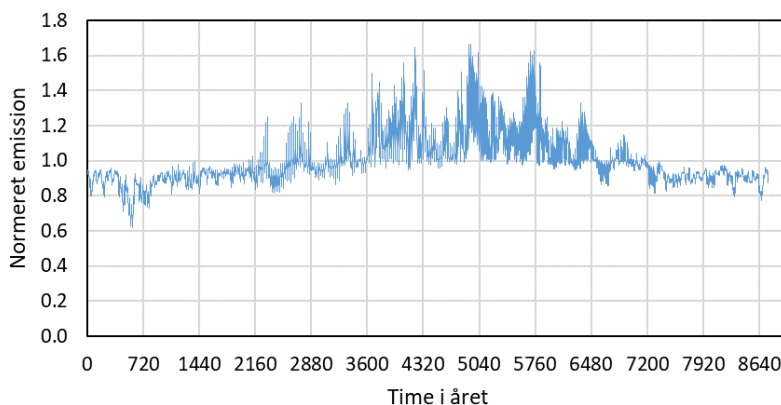
2.2.2 Meteorologiske data

OML-DEP anvender meteorologiske data for Lindet i Sønderjylland år 2005 fra vejrmodellen MM5 (*Grell et al., 1994*) udviklet af National Center for Atmospheric Research, USA (NCAR). OML anvender observationer fra Ålborg lufthavn for år 1974-83 bearbejdet med OML's præprocessor (*Olesen et al., 1988, 1987*).

I den seneste version af OML-Multi, version 7.0 (*Løfstrøm, 2020*) er det muligt at udføre depositions-beregninger for stalde med en simplificeret udgave af OML-DEP. Hertil anvendes meteorologiske data fra vejrmodellen WRF (Weather Research and Forecasting model; *Skamarock et al. 2008*), som er NCAR's afløser for MM5. Mere om de meteorologiske data kan læses i den tilhørende DCE-rapport (*Løfstrøm, 2019*).

2.2.3 Emission

OML (VVM-metoden) anvender i notatets eksempler en konstant emission gennem hele beregningsperioden, hvorimod OML-DEP anvender en emission, som varierer i forhold til udetemperatur og behovet for luftudskifte i en svinestald. Figur 2.1 viser et typisk eksempel på variationen henover et år. Beregninger for en 3 m høj punktkilde, som også anvendes senere, viser, at anvendelse af konstant emission kun giver ca. 4 % højere deposition i alle afstande ud til 4 km.



Figur 2.1. Tidlig variation i emissionen anvendt i OML-DEP. Årsmiddel for emissionen er 1,0.

2.2.4 Algoritme for tørdeposition

Den mest afgørende forskel mellem metoderne er algoritmen for beregningen af depositionen for den enkelte time i beregningsperioden.

Grundlæggende skal tørdepositionsraten for et givent tidspunkt, t , beregnes som et produkt af stofkoncentration i luften, $c(t)$, og en depositions hastighed, $v_d(t)$. Tørdepositionen for en given time er produktet af depositionsraten og varigheden:

$$c(t) \cdot v_d(t) \cdot \Delta t$$

hvor Δt er 1 time, som også er midlingstiden for $c(t)$ og $v_d(t)$. Den årlige tørdepositionen beregnes ved at summere over årets timer.

OML-DEP beregner depositionen på denne måde ved brug af avancerede algoritmer (*Simpson et al., 2003*) for beregning af depositions hastigheden, som varierer og afhænger af luftens turbulens, fugtighed, overfladetyper, skydækket, årstiden samt baggrundskoncentrationer af ammoniak og svovldioxid. Et eksempel på variationen i depositions hastigheden vises i næste afsnit. OML-DEP tager hensyn til, at den deponerede ammoniak opstrøms for et beregningspunkt mangler ved beregningen i punktet.

Ved beregning af den årlige deposition anvender OML (VVM-metoden) en konstant depositions hastighed, som multipliceres med en 10-årsmiddelværdi for koncentrationen og med tiden (et år). VVM-metoden er et simpelt og konservativt alternativ til OML-DEP. I DCE-notatet fra 2014 er givet eksempler fra litteraturen på målte eller anvendte depositions hastigheder. OML (VVM-metoden) tager *ikke* hensyn til, at den deponerede ammoniak opstrøms for et beregningspunkt mangler i beregningspunktet, men antager, at alt stof stadig

findes i røgfanen. Dermed vil OML (VVM-metoden) overestimere depositionen, og overestimeringen vil stige med afstanden.

2.3 Beregningseksempel

Ved beregningerne til IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk (Geels et al., 2006; Løfstrøm, 2010) er anvendt punktkilder med afkasthøjde på enten 6 m eller 3 m. De øvrige kildedata er ens for begge kilder: Bygningshøjde på 5,5 m, afkastdiameter på 1,0 m, temperatur på 25 °C og volumenstrøm på 3,5 Nm³/s. I de følgende eksempler på beregninger af deposition af ammoniak er anvendt data for kilden på 3 m, idet den er bedst sammenlignelig med en fladekilde. Der er anvendt en emission på 1 ton NH₃/år. Oplandet er landbrugsland med aerodynamisk ruhed på 0,1 m. Depositionen i forskellige afstande beregnes som det årlige gennemsnitlige for alle retninger (middelværdi for cirkel).

I tabel 2.1 er vist et eksempel for depositionen til skov i forskellige afstande beregnet med OML's VVM-metode og IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk. For OML er anvendt en depositions hastighed på 3 cm/s (Løfstrøm, 2014). Antal decimaler i tabellen er ikke et udtryk for præcisionen. OML overestimerer i forhold til IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk med en faktor ca. 3 i nærområdet til faktor ca. 12 i 4 km's afstand. Det er der flere forklaringer på, som gives i det følgende.

Tabel 2.1. Deposition fra en 3 m høj punktkilde til skov, som befinder sig i forskellige afstande med landbrugsopland. Beregninger med OML (VVM-metoden) og IT-system i husdyrgodkendelser.dk. Øvrige data kan ses i teksten.

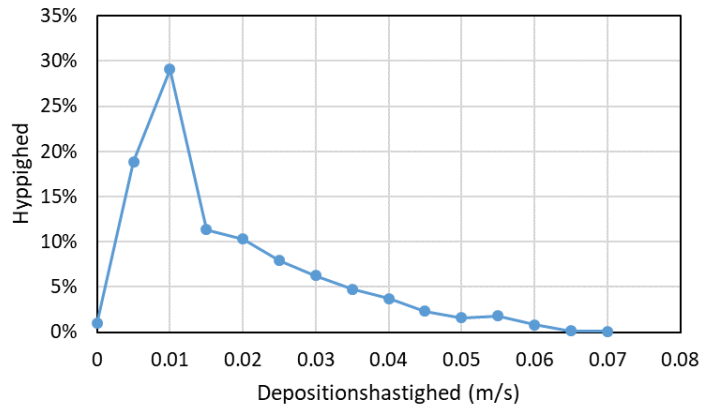
Afstand (m)	OML (kg/ha)	IT-system (kg/ha)	OML/IT-system
100	9,87	3,822	2,6
200	3,53	1,182	3,0
300	1,99	0,551	3,6
500	1,01	0,210	4,8
1100	0,38	0,053	7,0
2000	0,18	0,021	8,9
3000	0,11	0,011	10,4
4000	0,08	0,007	11,6

2.3.1 Opstrøms dræn af ammoniak

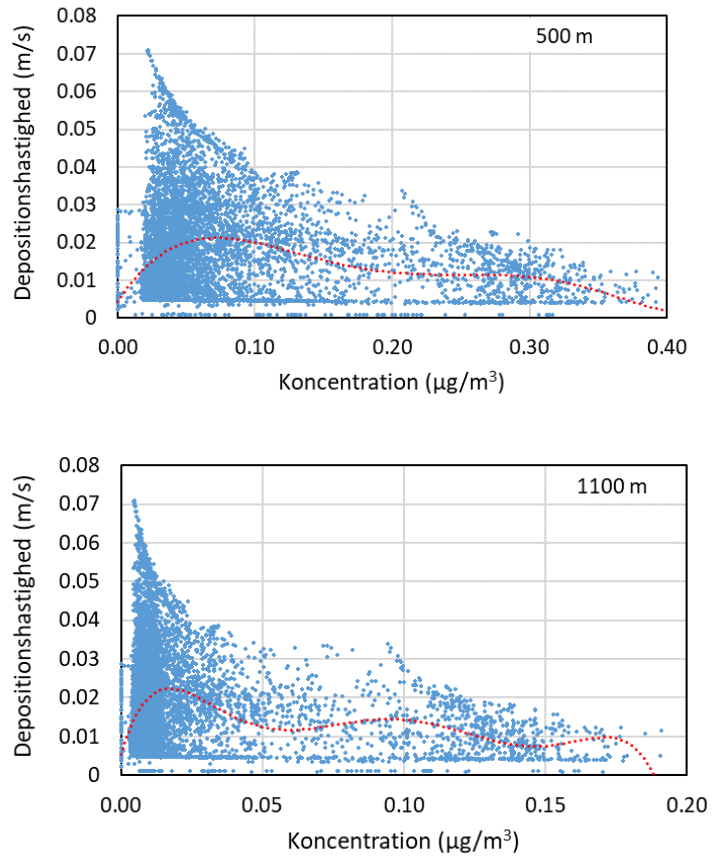
Den stigende forskel i den beregnede deposition med afstanden skyldes især, at OML (VVM-metoden) ikke tager hensyn til, at der opstrøms er deponeret stof før receptorpunktet, og denne effekt vokser med afstanden, idet røgfanen langsomt drænes for ammoniak. Stigningen i forskellen er ca. en faktor 4 i afstanden fra 200 m til 4 km. Dog kan effekten af opstrøms deposition kun forklare ca. en faktor 2 af stigningen i 4 km (figur 2.2 i Løfstrøm, 2020).

2.3.2 Effektiv depositionshastighed

Forskellen på en faktor ca. 3 i nærområdet skyldes, at depositionshastigheden reelt ikke er en konstant, som det fremgår af det følgende. I figur 2.2 er vist hyppighedsfordelingen af depositionshastigheder beregnet for hver time med OML-DEP i forbindelse med NOVANA-beregninger. De meteorologiske data er for Lindet i Sønderjylland i 2019 fra vejrmodellen WRF. Hyppigheden er opgjort i intervaller af 0,25 cm/s. Middelshastigheden er 1,8 cm/s og medianværdien er 1,2 cm/s. Dette viser, at OML (VVM-metoden)'s anvendte konservative hastighed på 3 cm/s er for stor.



Figur 2.2. Hyppighedsfordeling af depositionshastigheder til skov beregnet med OML-DEP med WRF-meteorologi for Lindet, Sønderjylland i 2019.



Figur 2.3. Sammenhæng mellem depositions­hastigheder til skov beregnet med OML-DEP og koncentrationer beregnet med OML (uden deposition) for 3 m høj punktkilde i 500 m og 1100 m for timerne i 2019. Koncentrationer er middelværdier for alle retninger i cirkelafstanden (den maksimale koncentration i et punkt i cirklen er i gennemsnit ca. 15 gange større). De­positions­hastighederne afhænger af meteorologien og er ens i de to afstande. De røde stiplede linjer er tilpassede polynomier.

Meridianværdien er en mere præcis værdi, idet høje koncentrationer korrelerer med lave depositions­hastigheder og omvendt (negativ korrelation), hvilket fremgår af figur 2.3, som viser samtidige værdier for ammoniak­koncentrationen fra OML og depositions­hastigheden fra OML-DEP i to afstande. Da de­positionen er produktet af koncentration, de­positions­hastighed og tid, vil anvendelsen af en årsmiddelsoncentration og en årsmiddelværdi for de­positions­hastigheden derfor overestimere den korrekte samlede de­position.

2.3.3 Meteorologiske data

En anden væsentlig årsag til forskellen mellem metoderne er forskelle i de meteorologiske data, som giver forskel i spredningsforholdene og dermed forskelle i middelkoncentrationerne. Med OML er der beregnet middelværdier for koncentrationen i forskellige afstande med forskellig meteorologi. De anvendte data er: Lindet 2005 (MM5); Aalborg 1974-83 og Kastrup 1976 (OML-præprocessor) samt Skrydstrup 2008-17 (WRF). Resultatet ses i tabel 2.2, hvor også forholdet mellem forskellige beregninger vises. I forhold til IT-systemets i husdyrgodkendelser.dk anvendte meteorologi (Lindet 2005) ligger middelværdierne med Aalborg-data omtrent på samme niveau i nærområdet og en faktor 2,5 højere i 4 km. For data for Aalborg og Kastrup er niveauerne stort set ens, ligesom de indbyrdes niveauer for Lindet- og Skrydstrup-data stort set er ens.

At Skrydstrup-WRF data giver lavere middelværdier end Kastrup data virker umiddelbart i modstrid med resultater fra tidligere beregninger (Løfstrøm, 2019), hvor middelværdierne for WRF data var større end for Kastrup data. Men de tidligere beregninger vedrørte den absolut største middelværdi uanset retning og afstand mod de her beregnede middelværdier i en cirkel. Dette, og at vindretningerne i Kastrup for år 1976 var mere jævnt fordelt, betyder, at den absolut største middelværdi for Kastrup var forholdsvis lav. Ved at anvende en middelværdi over alle retninger, som i tabel 2.2, fås et mere stabilt tal, som er mere retvisende for de generelle forhold.

Tabel 2.2. OML-beregninger af middelkoncentrationen for alle retninger i forskellige afstande for fire forskellige meteorologiske datasæt og perioder. For udvalgte datasæt er koncentrationsforholdet også vist.

Afstand (m)	Aalborg 1974-83 ug/m ³	Lindet 2005 ug/m ³	Skrydstrup 2008-17 ug/m ³	Kastrup 1976 ug/m ³	Aalborg/Lindet	Skrydstrup Lindet	Aalborg/Skrydstrup	Aalborg/Kastrup
100	1,043	1,103	1,002	1,144	0,95	0,91	1,04	0,912
200	0,373	0,329	0,314	0,402	1,13	0,96	1,19	0,928
300	0,210	0,156	0,158	0,222	1,35	1,01	1,33	0,944
500	0,106	0,061	0,068	0,109	1,73	1,10	1,57	0,977
1100	0,040	0,017	0,020	0,038	2,34	1,16	2,01	1,056
2000	0,019	0,007	0,008	0,017	2,58	1,13	2,29	1,132
3000	0,012	0,005	0,005	0,010	2,59	1,09	2,37	1,192
4000	0,008	0,003	0,004	0,007	2,54	1,07	2,37	1,237

2.4 Deposition til græs og vand

For den 3 m høje punktkilde er der tilsvarende set på forskellen i depositionen til græs og vandoverflader beregnet med OML (VVM-metoden) og IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk ved landbrugsopland. For græs er i OML (VVM metoden) anvendt en depositions-hastighed på 1,5 cm/s og for vand 0,76 cm/s (Løfstrøm, 2014). I tabel 2.3 er listet forholdet mellem metoderne i forskellige afstande suppleret med forholdet for skov fra tabel 2.1. (For IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk er for græs anvendt 'Blandet natur' med ruhed på 0,1 m.) For græs er OML (VVM metoden)'s overestimering i forhold til IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk omtrent som for skov. For vandoverflader er overestimeringen lidt mindre.

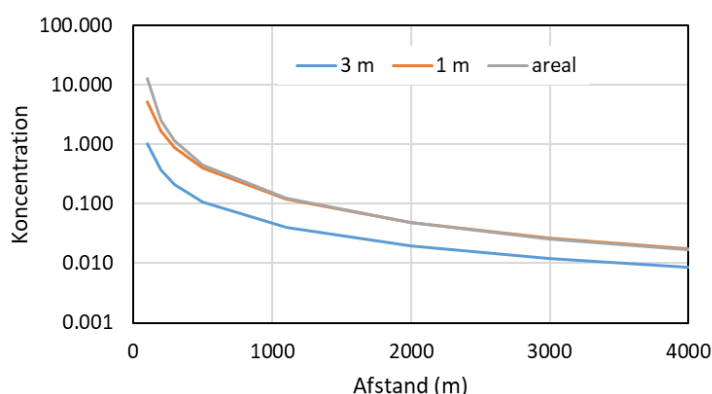
Tabel 2.3. Forhold mellem ammoniakdepositionen til forskellige overflader ved landbrugsopland beregnet med OML (VVM-metoden) og IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk for 3 m høj kilde.

Afstand (m)	OML / IT-system		
	Skov	Græs	Vand
100	2,6	2,1	1,4
200	3,0	2,4	1,6
300	3,6	2,9	2,0
500	4,8	3,9	2,8
1100	7,0	5,9	4,6
2000	8,9	7,5	6,1
3000	10,4	8,9	7,4
4000	11,6	10,0	8,6

2.5 Koncentrationsforskel mellem fladekilde og punktkilder

For en fladekilde med samme emission, som den her anvendte punktkilde på 3 m, vil der være en forventelig forskel på koncentrationer i omgivelserne. En væsentlig årsag hertil er, at modsat en fladekilde, har punktkilden et røgfaneløft på grund af, at temperaturen i afkastet er lidt højere end omgivelsernes, og at der er en vertikal hastighed i afkastet. Røgfaneløftet vil forsinke røgfanens kontakt med jordoverfladen, hvorved koncentrationen vil være lavere end for fladekildens udslip ved jordoverfladen.

Til eksempel er i figur 2.4 og tabel 2.4 vist OML-beregne koncentrationer (uden deposition) i forskellige afstande for punktkilden og en fladekilde på 200 m x 200 m for meteorologiske data for Ålborg 1974-83. Punktkilden er placeret i centrum af arealkilden. Til sammenligning er også vist koncentrationer for en 1 m høj punktkilde uden røgfaneløft (dvs. temperatur som omgivelser og ingen vertikalhastighed på røgfanen). Koncentrationerne for kilden på 3 m er, som forventet, mindre end for kilden på 1 m og arealkilden, og er i afstanden 200-300 m ca. 5-6 gange mindre. For de første par hundrede meter er koncentrationerne for arealkilden en del højere end for kilden på 1 m, idet receptorpunkterne ligger inden for arealkilden eller lige uden for. I afstande over ca. 500 m er forskellen relativ lille.



Figur 2.4. Middelkoncentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) beregnet med OML for to punktkilder og en arealkilde på 200 m x 200 m. Kildedata er beskrevet i teksten. Bemærk den logaritmiske skala for koncentrationen.

Tabel 2.4. Middelkoncentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) beregnet med OML for tre forskellige lave kilder beskrevet i teksten. Meteorologiske data fra Aalborg 1974-83.

Afstand (m)	Pkt. 3 m	Pkt. 1 m	Areal	Areal/3 m	Areal/1 m
100	1,043	5,106	12,828	12,30	2,51
200	0,373	1,677	2,498	6,69	1,49
300	0,210	0,883	1,132	5,39	1,28
500	0,106	0,398	0,456	4,29	1,15
1100	0,040	0,119	0,124	3,12	1,04
2000	0,019	0,048	0,048	2,48	0,99
3000	0,012	0,027	0,026	2,16	0,97
4000	0,008	0,018	0,017	1,99	0,95

Hvis depositionen for arealkilden beregnes med OML (VVM-metoden) vil depositionen i tabel 2.1 for en punktkilde skulle multipliceres med faktoren *Areal/3 m* fra tabel 2.4, dvs. fx med faktor 6,69 i 200 m og 1,99 i 4 km. Herved ville forskellen til IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk i samme afstande blive en faktor 24 ($3,53 \cdot 6,69$) respektive 23 ($11,6 \cdot 1,99$).

2.6 Sammenfatning om forskelle i deposition til skov

For den 3 m høje punktkilde med røgfaneløft beregner OML (VVM metoden) med en konstant depositions-hastighed for ammoniak på 3 cm/s til skov 3 til 12 gange højere deposition i afstanden 200 m til 4 km i forhold til IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk.

I 4 km skyldes en faktor 2, at OML ikke tager hensyn til deposition i oplandet. Derved er den ikke-forklarede forskel reduceret til en faktor 3 til 6 i afstanden 200 m til 4 km.

Depositionshastighed i OML på 3 cm/s er for stor i forhold til en meridian hastighed på 1,2 cm/s beregnet med OML-DEP. I afstanden 200 m, hvor oplandsdeposition kun har marginal betydning, viser data, at en konstant hastighed på ca. 1/3 af den anvendte for OML, vil være mere korrekt. Hermed vil forskellen i 200 m omtrent forsvinde, og den u-forklarede forskel i afstanden 4 km reduceres til en faktor 2.

Denne forskel i 4 km's afstand fra kilden skyldes forskel i de anvendte meteorologiske data for Lindet 2005 (IT-systemet for husdyrgodkendelser.dk) og Ålborg 1974-83 (OML (VVM metoden)), som det fremgår af tabel 2.2.

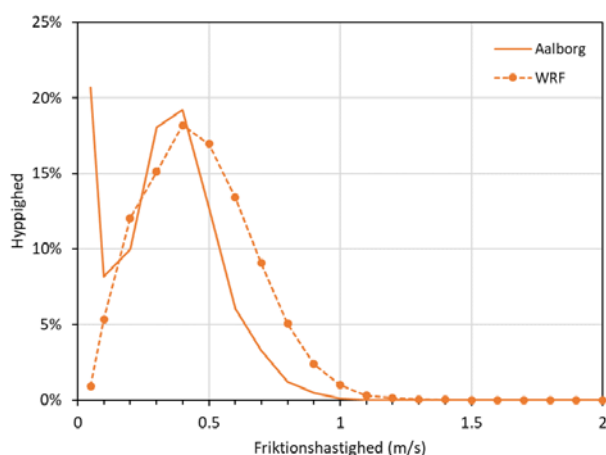
Hvis depositionen for kilden på 3 m sammenlignes med en fladekilde på fx 200 m x 200 m, som dog er en helt anden kildetype, så vil forskellen i afstanden 200-300 m stige med en faktor 5-6, idet den manglende røgfaneløft giver høje koncentrationer ved jorden.

3 Forbedrede depositionsberegninger

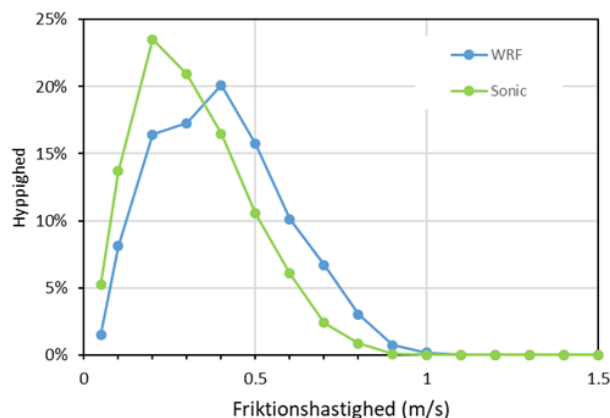
Af kapitel 2 fremgår det, at for den 3 m høje kilde skyldes forskellene i beregnet deposition af ammoniak mellem IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk og OML (VVM-metoden) tre forhold: Ingen opstrømsdeposition i OML, middel-depositionshastigheden er reelt mindre end eksempler fra DCE-notat fra 2014, samt forskel i de meteorologiske data. Der kan opstilles tilnærmede korrektioner for de to første forhold, men forskellen i den anvendte meteorologi er af grundlæggende betydning.

I DCE-rapporten (Løfstrøm, 2019) er meteorologiske WRF-data evalueret mod dels mastemålinger og dels 'standard' OML-meteorologiske data (Aalborg og Kastrup) via en sammenligning af hyppighedsfordelinger af centrale meteorologiske parametre. WRF data har generelt en rimelig god overensstemmelse med både målinger og 'standard' data. Kapitel 2 viser dog, at der er forskelle i beregnede middelkoncentrationer ved anvendelse af de forskellige meteorologiske data. Det er ikke umiddelbart muligt at afgøre, hvilke meteorologiske data 'standard' eller WRF, som giver den mest korrekte beregning af middelværdier for koncentrationen.

Dog udviser Aalborg data en større hyppighed af meget lave friktionshastigheder end WRF data, som det fremgår af figur 3.1 med data fra DCE-rapporten (Løfstrøm, 2019). Friktionshastigheden er et udtryk for turbulens, som tilnærmelsesvis er proportional med vindhastigheden og dermed fortyndingsevnen. Den større hyppighed af meget lave friktionshastigheder for Aalborg (indirekte estimeret med OML's præprocessor) er formodentligt udtryk for fejlagtige målinger, idet sammenligning af friktionshastigheder mellem WRF og direkte målinger med ultrasonic fra mast i rapporten viser god overensstemmelse og ingen stor hyppighed af lave værdier, som det fremgår i figur 3.2. Dette kan forklare, at beregninger med Aalborg 1974-83 data generelt giver højere middelværdier af koncentrationen end ved anvendelse af WRF data. Dette har dog ikke markant indflydelse på maksimale månedlige 99 %-fraktiler, jf. (Løfstrøm, 2019) tabel 5.2, idet det kun er de 7 til 8 højeste timeværdier i måneden, som bestemmer værdien.



Figur 3.1. Hyppigheden af friktionshastigheder (et udtryk for turbulens) for 5-årsperioden 1979-83 for Aalborg OML-data og WRF data (Himmerland). Hyppigheden er markeret ud for den øvre værdi af parameterinterval (Løfstrøm, 2019).



Figur 3.2. Hyppigheden af friktionshastighed (turbulens) for perioden 25/1-2005 til 22/2-2006. Målinger med ultrasonic fra en mark ved Ringsted og WRF data er for punkt 15 km mod nordvest. Hyppigheden er markeret ud for den øvre værdi af parameterinterval (Løfstrøm, 2019).

Depositionsberegninger under NOVANA-programmet (fx Ellermann et al., 2019) viser, at anvendelsen af vejrmodel data (WRF data) giver god overensstemmelse med målte årsmiddelværdier for koncentrationen. Det indikerer, at anvendelsen af WRF data er rimelig.

På baggrund af WRF's bedre data for friktionshastighed og til dels også de gode sammenligninger for middelværdier i NOVANA vurderes det, at beregninger af deposition mest korrekt bør udføres med WRF data i stedet for Aalborg data.

Sammen med OML-Multi 7.0 udgivet i august 2020, følger WRF meteorologiske datasæt med 10 års data for 10 områder i Danmark (figur 3.3). Datasættene er tilpasset modellens mulighed for estimering af deposition af ammoniak fra lave (< 15 m) punktkilder på stalde (www.au.dk/oml). Disse meteorologiske data fra WRF kan anvendes til generelle depositionsberegninger i relation til OML (VVM metoden) (konstant depositionshastighed uden opstrøms deposition).

3.1 Lave punktkilder

Depositionen af ammoniak i relation til VVM og DCE-rapporten fra 2014 kan med forbedret præcision estimeres på to metoder. Valg af metode afhænger af, om kilden er sammenlignelig med staldventilation eller ikke. Metoderne beskrives i det følgende.

3.1.1 Anvendelse af staldberegninger for husdyrbrug

I OML-Multi 7.0 er det muligt at foretage beregning af lokal deposition af ammoniak fra stalde i relation til miljøgodkendelse af husdyrbrug (DCE-rapport, Løfstrøm, 2020). Metoden er baseret på en simplificering af metoderne i den fulde model OML-DEP, som ligger til grund for MST's IT-system under husdyrgodkendelser.dk.

Hvis der er tale om lave punktkilder med konstant emission, hvor bygninger er sammenlignelige med staldbygninger, dvs. ca. 5 m og staldventilation (ca. 25 °C, 3,5 Nm³/s og diameter 1 m), så kan OML's metode under 'Husdyrbrug, NH3' - 'Kategori 2 natur' anvendes til et estimat. Hvis bygningshøjde, temperatur eller volumenstrøm er mindre, vil metoden være lidt konservativ. Metoden kan anvendes, hvis emissionen er nær konstant gennem alle årets timer.

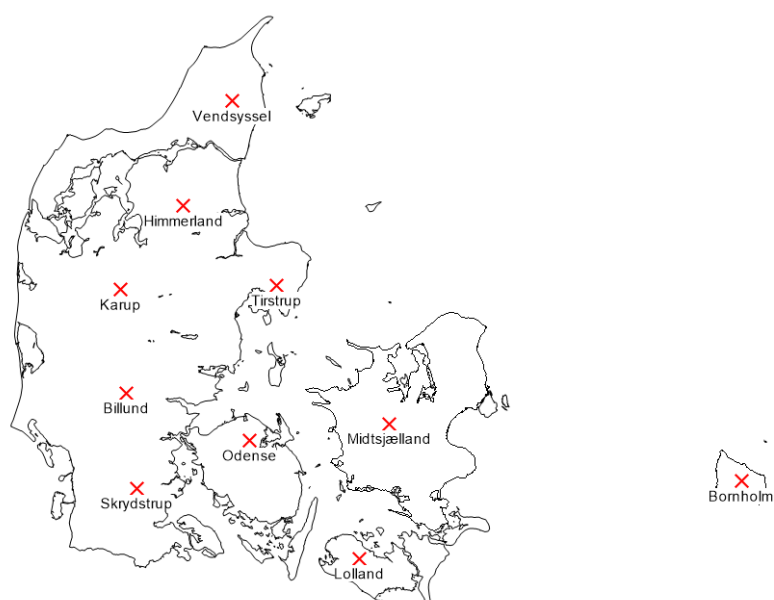
Skorstenshøjden skal være mindre end 15 m. Dog er antallet af receptorpunkter (naturpunkter), hvor der skal bestemmes tørdeposition, begrænset til 10 per beregning. Hvis der kun er emission i en del af døgnets timer eller dele af året, er metoden ikke anvendelig. Metoden tager hensyn til depositions hastighed mellem kilde og receptor og anvender en beregnet depositions hastighed for hver time. Den anvender ét blandt 10 meteorologiske WRF datasæt, som hver består af 10 år. De 10 datasæt repræsenterer 10 områder i Danmark (figur 3.3). OML vælger automatisk de rette WRF data. Flere detaljer i DCE-rapport (*Løfstrøm, 2020*). Metoden kan kun anvendes for ammoniak.

3.1.2 Ny meteorologi og korrigeret depositions hastighed i VVM-metoden

Den her beskrevne metode kan anvendes for punktkilder lavere end 3 m, og som har et beskedent røgfanløft som ved staldventilation (3.1.1) eller mindre, idet metoden bygger på resultater fra kapitel 2. For kilder uden røgfanløft vurderes metoden at være lidt konservativ.

3.1.3 Meteorologiske data

I forhold til metoden beskrevet i DCE-notat fra 2014, hvor der anvendes meteorologiske data for Aalborg 1974-83, anvendes her et sæt af data, som er bedre til beregning af (langtids-)middelværdier. Metoden anvender ét blandt 10 meteorologiske WRF datasæt, som hver består af 10 år. De 10 datasæt repræsenterer 10 områder i Danmark. Herved anvendes samme data som i foregående afsnit 3.1.1 fra DCE-rapport (*Løfstrøm, 2020*). De 10 områder er Vendsyssel, Himmerland, Karup, Tirstrup, Billund, Skrydstrup, Odense, Midtsjælland, Lolland og Bornholm, som det fremgår af figur 3.3. Ved en konkret beregning vælger man det nærmeste datasæt.



Figur 3.3. Positioner for 10 meteorologiske WRF datasæt.

3.1.4 Depositionshastighed i nærområdet

DCE-notatet fra 2014 angiver eksempler fra litteraturen på målte eller anvendte depositionshastigheder. Af kapitel 2 fremgår det, at den anvendte hastighed på 3 cm/s for ammoniak til skov i nærområdet (100 m) burde være omkring 2,6 gange mindre (1,2 cm/s) for den anvendte punktkilde på 3 m. Denne hastighed er bedre at anvende for ammoniak i nærområdet.

For depositionshastighederne til græs og vandoverflade angiver DCE-notatet værdierne 1,5 cm/s respektive 0,76 cm/s. OML-beregninger sammenlignet med IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk i kapitel 2 viser, at disse hastigheder med god tilnærmelse kan reduceres med ca. faktor 2,1 respektive 1,4 svarende til 0,71 og 0,54 cm/s.

Disse depositionshastigheder stemmer godt overens med resultater fra en litteraturgennemgang over målinger og modelberegninger udført i årene 2004-14 (Schrader & Brümmer, 2014). De viste, at meridianhastighederne for blandet skov, semi-natur (græsarealer) og vand var henholdsvis 1,2, 0,8 og 0,6 cm/s.

3.1.5 Depositionshastighed korrigeret for deposition i oplandet

Af kapitel 2 fremgår det ligeledes, at der bør tages hensyn til deposition i oplandet, hvilket ellers kunne medføre overestimering, som i 4 km kunne andrage en faktor ca. 2. Derfor opnås et bedre estimat for depositionen for en konkret afstand ved at reducere koncentrationen. Der kan anvendes samme reduktion/korrektion som i DCE-rapporten fra 2020 (Løfstrøm 2020) for en 6 m høj kilde, hvilket dog er en lille smule konservativt i forhold til 3 m kilden, hvor der ikke foreligger korrektionsdata. Korrektionen er bestemt for beregninger med WRF data. Hvorvidt korrektionen for Aalborg data er den samme er ikke undersøgt, men vil formodentligt være af samme størrelse.

Tablet 3.1. Korrektion af NH₃-koncentrationen for lav kilde for forskellige oplande ved OML-beregning, hvor der ikke indgår opstrøms deposition, samt OML-DEP's tilhørende depositionshastigheder, v_d (meridianværdier), for oplandet.

Afstand (m)	Opland og aerodynamisk ruhed (m)			
	Ringe vegetation	Landbrug	Mellemhøj natur	Skov
v_d (cm/s)	0,05 0,71	0,1 0,85	0,3 1,0	1,0 1,2
0	1,00	1,00	1,00	1,00
50	0,97	0,97	0,97	0,95
100	0,95	0,95	0,94	0,91
150	0,93	0,92	0,91	0,88
200	0,91	0,90	0,89	0,86
250	0,89	0,89	0,87	0,84
300	0,88	0,87	0,86	0,82
350	0,86	0,86	0,84	0,81
400	0,85	0,85	0,83	0,80
450	0,84	0,83	0,82	0,79
500	0,83	0,82	0,81	0,78
600	0,81	0,81	0,79	0,77
700	0,80	0,79	0,78	0,75
800	0,78	0,78	0,77	0,73
900	0,77	0,76	0,75	0,72
1000	0,75	0,75	0,74	0,71
2000	0,72	0,71	0,70	0,68
3000	0,64	0,63	0,61	0,58
4000	0,53	0,52	0,49	0,43

Korrektionen af koncentrationen vist i tabel 3.1. Tabellen bygger på, at de største middelkoncentrationer optræder tættest på kilden, som det vil være tilfældet for lavekilder med stor bygningspåvirkning eller fladekilder. Værdierne i kort afstand (50 m) har størst usikkerhed. I tabellen er vist afstandskorrektion for forskellige oplande (overflader mellem kilde og naturpunkt). 'Mellemhøj natur' kan også tolkes som en blanding af områder med landbrug og skov. I kortere afstande end 100 m anvendes værdien i 100 m, idet data dér er mere usikre, men en forskel vil være meget lille. OML-DEP's depositions-hastigheder (meridianværdier) for oplandene er også vist.

Disse afstandskorrektioner skal anvendes sammen med depositions-hastigheder til de relevante naturområder (receptorpunkter i en OML-beregning). På grundlag af det foregående og beregninger med OML-DEP er der i tabel 3.2 givet de bedste vurderinger af depositions-hastigheder for ammoniak til naturområder. Hastighederne er bestemt for 2019, men det vurderes, at de ikke skulle være væsentlig anderledes for andre ikke unormale år.

Tabel 3.2. Årlige depositions-hastigheder, V_{d,NH_3} , for ammoniak til forskellige typer natur karakteriseret ved bl.a. ruheden. OML-

Natur Ruhed (m)	Vand 0,001	Græs 0,05	Lav natur 0,1	Mellemhøj N. natur 0,3	Skov 1,0
V_{d,NH_3} (cm/s)	0,54	0,71	0,85	1,0	1,2

Tabel 3.3. Eksempler på korrigerede depositions-hastigheder (cm/s) for ammoniak til forskellige typer natur og afstande ved landbrugsopland til anvendelse for OML-estimat af deposition fra lave kilder.

Afstand (m)	Naturområde				
	Vand	Græs	Lav natur	Mellemhøj	Skov
0	0,54	0,71	0,85	1,00	1,20
50	0,52	0,69	0,82	0,97	1,16
100	0,51	0,67	0,81	0,95	1,14
150	0,50	0,65	0,78	0,92	1,10
200	0,49	0,64	0,77	0,90	1,08
250	0,48	0,63	0,76	0,89	1,07
300	0,47	0,62	0,74	0,87	1,04
350	0,46	0,61	0,73	0,86	1,03
400	0,46	0,60	0,72	0,85	1,02
450	0,45	0,59	0,71	0,83	1,00
500	0,44	0,58	0,70	0,82	0,98
600	0,44	0,58	0,69	0,81	0,97
700	0,43	0,56	0,67	0,79	0,95
800	0,42	0,55	0,66	0,78	0,94
900	0,41	0,54	0,65	0,76	0,91
1000	0,41	0,53	0,64	0,75	0,90
2000	0,36	0,48	0,57	0,67	0,80
3000	0,32	0,42	0,50	0,59	0,71
4000	0,28	0,37	0,44	0,52	0,62

Det er ikke praktisk muligt i en OML-beregning at korrigere koncentrationerne med faktorerne i tabel 3.1. I forhold til beregningen af depositionen er det derfor lettere at korrigere depositions-hastigheden i tabel 3.2 med faktorerne fra tabel 3.1. Til eksempel vil depositions-hastigheden til skov i afstanden 400 m ved et *landbrugsopland* skulle sættes til $1,2 \text{ cm/s} * 0,85 = 1,02 \text{ cm/s}$. Havde oplandet bestået af skov skulle faktoren have været 0,80. Flere eksem-

pler for korrigerede depositionshastigheder til forskellig natur i forskellige afstande er vist i tabel 3.3 for landbrugsopland. For andre oplande vælges relevant oplandstype fra tabel 3.1 og kombineres med tabel 3.2.

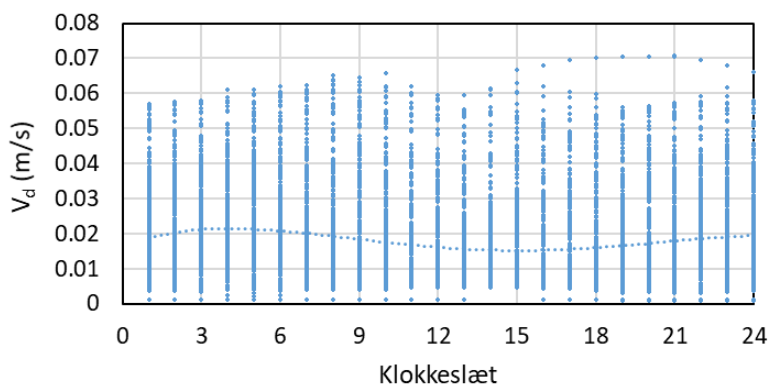
Da korrektionen afhænger af afstanden, må man ved en konkret depositionsberegning i OML vælge en korrektion svarende til det nærmeste kritiske naturpunkt. For fjernere beliggende naturpunkter vil beregningen dermed være konservativ. Alternativt kan der udføres flere OML-beregninger, som fokuserer på bestemte afstande. For afstande større end 4 km kan man konservativt anvende værdierne i 4 km, idet der ikke er tilgængelige data for større afstande.

3.2 Betydning af døgnrytme i emissionen

Depositionshastighedernes systematiske variation over døgnet er belyst for ammoniak i figur 3.4, hvor fordelingen over døgnet for 2019 er vist. Det ses, at v_d i gennemsnit er lidt mindre i dagtimerne end i nattetimerne. Dette skyldes, at om natten er den relative fugtighed større, hvilket øger v_d .

Hvis der således kun er emission i dagtimerne, kan der forventes en smule lavere deponeret mængde ammoniak i forhold til samme emission fordelt jævnt over døgnet. Middelværdien for det tilpassede polynomie er noget højere end meridianværdien fra tabel 3.2 på 1,2 cm/s. Det viser, at korrelationen mellem koncentration og v_d har betydning for den årlige depositionshastighed. Derfor kan betydningen af emissionsfordelingen i døgnet ikke umiddelbart bestemmes præcist ud fra det tilpassede polynomie. Der kan kun opnås en tilnærmet relativ vurdering.

Metoden som beskrevet i afsnit 3.1.2 er derfor mest præcis, når emissionen er nær konstant gennem årets timer.



Figur 3.4. Depositionshastighed, v_d , til skov af ammoniak i 2019 fordelt på døgnetimer. Stiplet linje er et tilpasset polynomie.

3.3 Fladekilder

For deposition af ammoniak fra fladekilder (arealkilder) kan med god tilnærkelse anvendes den samme metode som beskrevet i afsnit 3.1.2 for lave punktkilder. For naturpunkter kan der anvendes de samme v_d , som angivet i tabel 3.2.

Fladekilders udslip ved jordoverfladen vil sammenlignet med den 3 m høje punktkilde give større koncentrationer tæt ved kilden, som for eksemplet i figur 2.4 og tabel 2.4. Dermed vil depositionen være større i det område. Det betyder, at der i princippet skulle anvendes en lidt anden afstandskorrektion

end i tabel 3.1 for punktilden. Sådanne data er ikke umiddelbart tilgængelige. Det vurderes, at korrektionen kun vil være lidt større (mindre korrektionssværdier), og dermed vil tabel 3.1 kun være lidt konservativ ved anvendelse for fladekilder.

3.4 Konkrete beregninger for flere naturpunkter

Ved en konkret estimering af ammoniakdeposition for en fladekilde eller en lav punktkilde udføres først en standard OML-beregningen uden deposition. Ved den efterfølgende beregningen af depositionen er der i en OML-beregning mulighed for at anvende 3 typer af overfladepunkter, defineret ved deres typenummer 1, 2 eller 3. For hver typenummer angives en depositions-hastighed. En simpel og konservativ tilgang er at vælge depositions-hastigheder fra tabel 3.2 og undlade en afstandskorrektion. En mere præcis tilgang med anvendelse af afstandskorrektion beskrives herunder.

Hvis man kun skal estimere deposition for op til 3 naturpunkter, vælges for hver naturpunkt/typenummer en depositions-hastighed fra tabel 3.2, som en afstandskorrigeres med værdier fra tabel 3.1. Her kan de 3 punkter fx være samme type natur, men med for skellig afstandskorrektion, eller fx forskellige naturtyper med forskellig afstandskorrektion.

Da der ved en OML-beregning typisk anvendes flere hundrede receptorpunkter, som alle har et typenummer, vil der være mange punkter, hvor den afstandskorrigerede depositions-hastighed ikke er repræsentativ. Da et typenummer repræsenterer en given naturtype og afstand, vil fjernere beliggende punkter med samme typenummer være estimeret konservativt og nærmere beliggende vil være underestimerede. Hvis der for et punkt i en anden afstand ønskes en mere præcis beregning af depositionen, må man foretage en ny depositions-beregninger med anvendelse af en afstandskorrigeret depositions-hastighed for denne afstand.

Princippet anvendes også for andre stoffer end ammoniak.

4 VVM metoden for NO, NO₂ og N₂O

Depositionen af ammoniak i OML-DEP og IT-systemet i husdyrgodkendelser.dk er, ligesom i kemi-transportmodellen DEHM anvendt i NOVANA-overvågningen og den fælles europæiske model EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) (EMEP, 2003), baseret på beregninger, hvor et mellemtrin er beregning af depositionshastigheden for ozon (O₃). Der foretages beregninger af optag gennem vegetationens stomata (spalteåbninger) og overflader. I modellerne optages ammoniak på samme vis, men korrigeres for stoffets egenskaber.

Samme metode anvendes for nitrogenoxid, NO₂, og flere andre stoffer i DEHM- og EMEP-modellerne, men er ikke indbygget i OML-DEP for disse stoffer.

Et studie af depositionshastigheder for O₃, NO₂ og nitrogenoxid, NO, til fyr, ahorn, asp og eg er udført i Michigan, USA (45 °N) (Wang *et al.*, 2020). For nogle sommerdage blev der udført målinger i kamre omkring enkelte grene sammen med modelberegninger. Studiet viste, at deposition for NO ikke kunne registreres, og at depositionshastighederne for NO₂ og O₃ stort set var ens og stemte overens med modelberegninger, men hastighederne varierede mellem trætyperne. Hastighederne var størst om dagen og nær nul om natten. De maksimale halvtimesthastigheder (for NO₂ og O₃) var for fyr, ahorn, asp og eg henholdsvis 0,16, 0,11, 0,36 og 0,076 cm/s. Døgngennemsnit var henholdsvis ca. 0,1, 0,05, 0,1 og 0,05 cm/s. Målingerne repræsenterer en sommerperiode, hvor depositionshastighederne forventes at være maksimale.

Kammermålinger af deposition til californisk eg (kammermåling på grene) i en sommerperiode viser hastigheder for NO₂ på 0,123 cm/s i dagtimer og 0,015 cm/s i nattetimer (Delaria *et al.*, 2018). Depositionen af NO var 0,012 og 0,005 cm/s for dag respektive nat. Et døgnmiddel vil således være 0,069 cm/s for NO₂, hvilket svarer nogenlunde til gennemsnittet for træarterne i Wangstudiet. For NO bliver døgnmiddelværdien 0,0085 cm/s.

Depositionshastigheder bestemt ved målinger på grene i kamre repræsenterer de maksimale hastigheder, idet der i frie omgivelser også vil være en transportmodstand i luften, som kun vil bidrage til lavere hastigheder.

I den regionale DEHM-model, som anvendes i NOVANA, er depositionshastigheden for NO nul og for NO₂ mindst en faktor 10-100 mindre end for ammoniak (Christensen, 2020). Det vil sige, at til eksempel for skov, hvor hastigheden for ammoniak (afsnit 3.1.2) er på 1,2 cm/s, ligger hastigheden for NO₂ i intervallet 0,012 - 0,12 cm/s.

Alle de nævnte studier viser, at depositionshastighederne for NO₂ i DCE-rapporten (Løfstrøm, 2014) på 1,2 cm/s til skov er meget for stor. Ligeledes er rapportens hastighed for NO på 0,2 cm/s for stor. Den væsentligste årsag er, at depositionshastighederne i DCE-rapporten refererer til maksimal værdier under ofte optimale forhold for deposition. Dertil kommer, at ved OML-beregninger (VVM-metoden) bør anvendes en hastighed, som repræsenterer en middelværdi.

På grundlag af studierne ovenfor vurderes en dansk årlig depositionshastighed for NO₂ til skov til at ligge i intervallet 0,012-0,069 cm/s. Da de overordnede depositionsmekanismer for NO₂ og NH₃ er de samme for vegetative overflader, vurderes det, at forholdet i depositionshastigheder for NH₃ mellem forskellige overflader er det samme for NO₂. Til eksempel er hastighedsforholdet mellem græs og skov for NH₃ (0,71/1,2), hvorved depositionshastighed for NO₂ til græs vurderes til 0,0071-0,041 cm/s. Tilsvarende vurderes depositionshastigheden for NO til skov at ligge i intervallet 0-0,0085 cm/s og til græs 0-0,0050 cm/s. Værdierne angivet i tabel 4.1, som erstatter tidligere vurdering i DCE-notat fra 2014 (Løfstrøm, 2014). Det vurderes, at deposition af lattergas, N₂O, er ubetydelig i lighed med NOVANA-beregninger med DEHM-modellen (Christensen, 2020).

Tabel 4.1. Årlige depositionshastigheder (cm/s) under danske vejrforhold til forskellig typer natur karakteriseret ved bl.a. ruhe-

Natur Ruhed (m)	Vand 0,001	Græs 0,05	Lav natur 0,1	Mellemhøj natur 0,3	Skov 1,0
NO	0-0,04 10 ⁻³	0-0,0050	0-0,0060	0-0,0071	0-0,0085
NO ₂	0,22 10 ⁻³	0,0071-0,041	0,0085-0,049	0,010-0,058	0,012-0,069
N ₂ O	0	0	0	0	0

4.1 Afstandskorrektion for lave kilder og andre stoffer

I forhold til depositionsberegninger med OML (VVM metoden med konstant depositionshastighed) for andre stoffer end ammoniak, vil middelkoncentrationen ligeledes i stigende grad blive overvurderet med stigende afstande fra kilden. Et groft estimat på andre stoffers overestimering, og dermed på størrelsen af en korrektion af koncentrationen, gives i det følgende. Korrektionen kan i praksis anvendes til korrektion af depositionshastigheden, v_d .

I afsnit 3.1.2 tabel 3.1 er angivet korrektioner til koncentrationen af ammoniak fra lav punktkilde for forskellige oplande som følge af deposition. Dette princip kan med en lidt grov interpolation overføres til stoffer med en anden v_d i oplandet.

Når v_d i oplandet for et stof er nul (eller ekstrem lille), så vil korrektionsfaktoren skulle være 1 i alle afstande. For v_d større end nul vil faktoren i en given afstand skulle være mindre og mindre med en stigende v_d , men aldrig blive eksakt nul. Derfor vil faktoren, F , for en given afstand, $dist$, og opland, opl , approksimeres med en eksponentiel funktion af v_d :

$$F(dist, opl) = \text{Exp}(-\text{alfa} * v_d),$$

hvor parameteren alfa afhænger af afstand og opland.

Fra tabel 3.1 kendes $F(dist, opl)$ for NH₃ for et given opland og afstand, samt en tilhørende depositionshastighed $v_{d, NH3}$. Dermed kan et groft estimat på en korrektionsfaktor til OML findes for et andet stof, x , med depositionshastighed i oplandet, $v_{d, x}$, idet alfa er ens for de to forskellige stoffer :

$$\text{alfa} = \text{Ln}(F(dist, opl)_{NH3}) / v_{d, NH3} = \text{Ln}(F(dist, opl)_x) / v_{d, x}, \text{ hvorved}$$

$$F(dist, opl)_x = \text{exp}(v_{d, x} / v_{d, NH3} * \text{Ln}(F(dist, opl)_{NH3})) \quad (1)$$

Bemærk, at her gælder værdien for $v_{d,x}$ for oplandet og den vil formodentligt være forskellig fra naturområdets $v_{d,x}$, som angives i en OML-beregning.

Til eksempel gives beregningen af korrektionsfaktoren for NO_2 ved et landbrugsopland i afstanden 1 km. Af tabel 3.1 aflæses $F(\text{dist,opl})_{\text{NH}_3}$ til 0,75, hvor V_{d,NH_3} er 0,85 cm/s. For NO_2 er den øvre værdi for v_{d,NO_2} 0,049 cm/s (tabel 4.1, landbrugsopland tilnærmet med lav natur), hvorved

$$F(1 \text{ km, Landbrug})_{\text{NO}_2} = \exp(0,049 / 0,85 * \text{Ln}(0,75)) = 0,98$$

I afstanden 1 km ved landbrugsopland bliver VVM-metodens korrigerede depositions hastighed for NO_2 til fx skov med en øvre værdi for v_{d,NO_2} på 0,069 cm/s herved

$$v_{d,\text{NO}_2,\text{korr}} = 0,98 v_{d,\text{NO}_2} = 0,98 * 0,069 \text{ cm/s} = 0,068 \text{ cm/s}$$

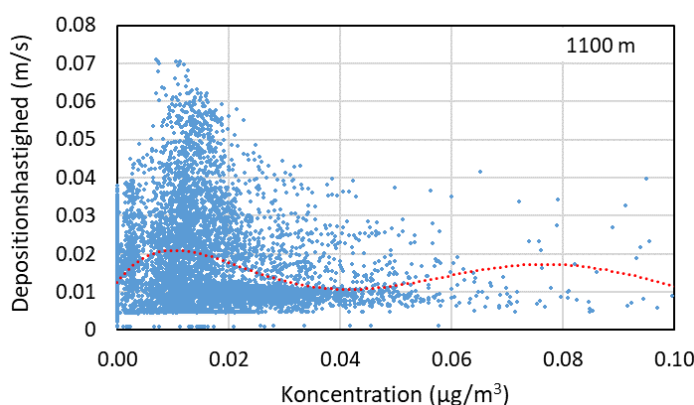
Hvis et stofs v_d i oplandet er større end v_{d,NH_3} , så vil metoden blive mere usikker, idet der ikke længere interpoleres, men ekstrapoleres uden for dataområdet.

5 VVM og høje punktkilder

Metoderne for lave punktkilder og fladekilder kan delvis anvendes for høje punktkilder. Vurderingen i det følgende er baseret på en 'almindelig' OML-beregning for en 100 m høj skorsten med øvrige data som for punktkilden på 3 m (dog er emissionen 10 gange større).

For høje punktkilder vil røgfanen i nattetimer med stabil atmosfærisk lagdeling sjældnere nå ned til jordoverfladen set i forhold til hyppigheden i dagtimerne. Modsat vil røgfanen for høje kilder oftere nå jordoverfladen ved relativt høje vindhastigheder, hvor v_d vil være relativt høje.

I figur 5.1 er vist sammenhængen mellem koncentrationen og v_d til skov beregnet med OML-DEP for afstanden 1100 m, som omtrent er afstanden, hvor den største årlige middelværdi optræder i OML. Koncentrationerne er middelværdier over alle retninger for timerne i år 2019. Sammenhængen mellem koncentrationer og v_d ligner meget de tilsvarende for en lav punktkilde i figur 2.3 med lidt lavere v_d ved højere koncentrationer. Derfor vil det for høje punktkilder være mere korrekt at anvende den samme v_d for NH_3 , som angivet i tabel 3.2, end at anvende værdierne fra DCE-notat fra 2014 (Løfstrøm, 2014).



Figur 5.1. Sammenhæng mellem depositionshastigheder for NH_3 til skov beregnet med OML-DEP og koncentrationer beregnet med OML (uden deposition) for 100 m høj punktkilde i 1100 m for timerne i 2019. Koncentrationer er middelværdier for alle retninger i cirkelafstanden (den maksimale koncentration i et punkt i cirklen er i gennemsnit ca. 27 gange større). Den røde stiplede linje er en tilpasset polynomie.

Derimod er det ikke korrekt at anvende afstandskorrekktionerne fra tabel 3.1, idet der ikke er den samme deposition i oplandet, da røgfanen oftest først når jorden i nogen afstand. Der er pt. ikke data til rådighed for at kunne vurdere en afstandskorrekktion af v_d for høje kilder til brug ved OML (VVM-metoden). Det vil formodentligt også blive vanskeligt at gøre dette, idet der er mange mulige kombinationer af skorstenshøjde og røgfaneløft.

6 Sammenfatning af anbefaling for anvendelse af VVM-metoden

I forhold til VVM-metoden beskrevet i DCE-notat fra 2014 (*Løfstrøm, 2014*) vil der sammenfattende opnås mere præcise estimater for tørdepositionen ved anvendelse af følgende justeringer.

Der bør anvendes justerede depositions hastigheder, som angivet i tabel 6.1. Værdierne afhænger ikke af hvilken kilde emissionen kommer fra.

Tabel 6.1. Årlige depositions hastigheder (cm/s) under danske vejrforhold til forskellige typer natur karakteriseret ved bl.a. ruhe-

Natur	Vand	Græs	Lav natur	Mellemhøj natur	Skov
Ruhed (m)	0,001	0,05	0,1	0,3	1,0
NH ₃	0,54	0,71	0,85	1,0	1,2
NO	0-0,04 10 ⁻³	0-0,0050	0-0,0060	0-0,0071	0-0,0085
NO ₂	0,22 10 ⁻³	0,0071-0,041	0,0085-0,049	0,010-0,058	0,012-0,069
N ₂ O	0	0	0	0	0

VVM-metoden (*Løfstrøm, 2014*) tager ikke hensyn til deposition i oplandet mellem kilde og receptor (naturpunkt), hvilket reelt reducerer koncentrationen i receptorpunkterne i forhold til en standard OML-beregning uden deposition. Derfor bør koncentrationen i princippet korrigeres ned med stigende korrektion ved stigende afstand. Det ikke lade sig gøre i en standard

Tabel 6.2. Korrektion af NH₃-koncentrationen, $F(dist,opl)_{NH_3}$, for lav kilde under danske vejrforhold for forskellige oplande ved OML-beregning, hvor der ikke indgår opstrøms deposition, samt tilhørende depositions hastigheder, V_{d,NH_3} , for oplandet.

Afstand (m)	Opland og aerodynamisk ruhed (m)			
	Ringe vegetation	Landbrug	Mellemhøj natur	Skov
	0,05	0,1	0,3	1,0
V_{d,NH_3} (cm/s)	0,71	0,85	1,0	1,2
0	1,00	1,00	1,00	1,00
50	0,97	0,97	0,97	0,95
100	0,95	0,95	0,94	0,91
150	0,93	0,92	0,91	0,88
200	0,91	0,90	0,89	0,86
250	0,89	0,89	0,87	0,84
300	0,88	0,87	0,86	0,82
350	0,86	0,86	0,84	0,81
400	0,85	0,85	0,83	0,80
450	0,84	0,83	0,82	0,79
500	0,83	0,82	0,81	0,78
600	0,81	0,81	0,79	0,77
700	0,80	0,79	0,78	0,75
800	0,78	0,78	0,77	0,73
900	0,77	0,76	0,75	0,72
1000	0,75	0,75	0,74	0,71
2000	0,72	0,71	0,70	0,68
3000	0,64	0,63	0,61	0,58
4000	0,53	0,52	0,49	0,43

beregning med OML. Derfor anbefales for lave punktkilder og fladekilder i stedet at korrigerer depositionshastigheden i den konkrete afstand, hvor depositionen skal estimeres. Korrektionsfaktoren afhænger af oplandet mellem kilden og receptoren. Faktoren er for ammoniak (NH_3) vist i tabel 10 (svarer til tabel 5) for forskellige oplande, hvis depositionshastigheder også er vist. Tabellen bygger på konstant emission, men vil med rimelighed kunne anvendes for varierende emission.

6.1 For bestemmelse af korrigeret depositionshastighed for andre stoffer

Fra tabel 6.2 kendes korrektionen for NH_3 , $F(\text{dist}, \text{opl})_{\text{NH}_3}$, for et given opland (opl) og afstand (dist), samt oplandets tilhørende depositionshastighed v_{d, NH_3} . På det grundlag kan et groft estimat på en korrektionsfaktor til OML findes for et andet stof, x , med depositionshastighed i oplandet, $v_{d, x}$:

$$F(\text{dist}, \text{opl})_x = \exp\left(\frac{v_{d, x}}{v_{d, \text{NH}_3}} \cdot \ln(F(\text{dist}, \text{opl})_{\text{NH}_3})\right) \quad (1)$$

Herved bliver et naturområdes depositionshastighed, $v_{d, x}^N$, korrigeret således:

$$v_{d, x, \text{korr}}^N = F(\text{dist}, \text{opl})_x \cdot v_{d, x}^N \quad (2)$$

Bemærk, at værdien for $v_{d, x}$ for oplandet i (1) ofte vil være forskellig fra $v_{d, x}^N$ for naturområdet (2). For en given afstand angives $v_{d, x, \text{korr}}^N$ i en OML-beregning.

For en OML-beregning med NO_x - emission ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) kan der yderligere komme en reduktion af $v_{d, x, \text{korr}}^N$ på grundlag af en estimeret NO_2 -%, som er afstandsafhængig, hvilket fremgår af DCE-notatet fra 2014. Er NO_2 -% i receptorpunktet fx 50, vil skulle $v_{d, x, \text{korr}}^N$ halveres.

Hvis et stofs v_d i oplandet er større end v_{d, NH_3} , så vil metoden blive usikker og korrektionen for NH_3 bør konservativt anvendes, idet der ikke længere interpoleres, men ekstrapoleres uden for dataområdet.

6.2 Meteorologiske data

VVM-metoden baserer sig på 10 års tidsserier af meteorologiske data. Hidtil har der i OML kun været adgang til 10 års data for Aalborg 1974-83. Med OML-Multi 7.0 kommer der nu 10 meteorologiske datasæt, som hver består af 10 år fra vejrmodellen WRF. Datasæt er fra følgende områder i Danmark: Vendsyssel, Himmerland, Karup, Tirstrup, Billund, Skrydstrup, Odense, Midtjylland, Lolland og Bornholm, som det fremgår af figur 3.3. Disse data vurderes at være bedre egnede til beregning af middelværdier og bør anvendes i stedet for Aalborg data. Ved en konkret beregning vælger man det nærmeste datasæt.

7 Referencer

- Christensen, J.H. (2020). Personlig kommunikation, ENV5, AU.
- Delaria, E.R., Vieira, m., Cremieux, J. & Cohen, R.C., 2018. Measurements of NO and NO₂ exchange between the atmosphere and *Quercus agrifolia*. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14161-14173, 2018.
- Ellermann, T., Andersen, H.V., Bossi, R., Brandt, J., Christensen, J., Frohn, L.M., Geels, C., Kemp, K., Løfstrøm, P., Mogensen, B.B. & Monies, C. (2006). Atmosfærisk deposition 2005, NOVANA, Danmarks Miljøundersøgelser, - Faglig rapport fra DMU 595: 66 s. <http://www2.dmu.dk/Pub/FR595.pdf>.
- Ellermann, T., Bossi, R., Nygaard, J., Christensen, J., Løfstrøm, P., Monies, C., Grundahl, L., Geels, C., Nielsen, I. E., & Poulsen, M. B., (2019). Atmosfærisk deposition 2017. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. 84s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 304. <http://dce2.au.dk/pub/SR304.pdf>.
- EMEP 2003. Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe, Part I. Unified EMEP Model Description, EMEP Status Report 2003, ISSN 0806-4520.
- Geels, C., Frohn, L.M., Hansen, K.M., Christensen, J.H. og Moseholm, L. (2006). Opdatering af beregningssystem til estimering af ammoniakafsætning fra husdyrbrug til brug for kommunernes administration af den kommende lov om godkendelse af husdyrbrug. Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Atmosfærisk Miljø, december 2006.
- Grell G.A., Dudhia J., Stauffer, D.R. (1994). A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NCAR/TN-398+STR, NCAR Technical Note.
- Løfstrøm, P. (2010). Opdatering af ammoniakafsætning fra husdyrbrug i IT-systemet, DMU, teknisk notat, december 2010.
- Løfstrøm, P. (2014). Anbefaling af metoder til estimering af tør- og våddeposition af gasser og partikler i relation til VVM. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, pp33. [http://dce,au,dk/fileadmin/dce,au,dk/Udgi-velser/Notater_2014/Notat_Deposition_og_VVM_DCE_28,jan,2014.pdf](http://dce.au.dk/fileadmin/dce,au,dk/Udgi-velser/Notater_2014/Notat_Deposition_og_VVM_DCE_28,jan,2014.pdf).
- Løfstrøm, P. (2019). Meteorologiske dataserier til OML modellen. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 72 s. - Teknisk rapport nr. 143. <http://dce2.au.dk/pub/TR143.pdf>
- Løfstrøm, P. (2020). Lokal deposition af ammoniak beregnet med OML. En simplificering af metode fra OML-DEP, Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 27 s, - Videnskabelig rapport nr. 380, <http://dce2,au,dk/pub/SR380.pdf>
- Olesen, H.R. and Brown, N, (1988). The OML meteorological preprocessor - a software package for the preparation of meteorological data for dispersion models. National Environmental Research Institute, MST LUFT-A 122.

Olesen, H.R., Berkowicz, R. & Løfstrøm, P. (2007). OML: Review of model formulation, National Environmental Research Institute, University of Aarhus - NERI Technical Report 609, 130 pp, (electronic), Available at: <http://www.dmu.dk/Pub/FR609.pdf>.

Olesen, H.R., Jensen, A.B. and Brown, N, (1987). An operational procedure for mixing height estimation. National Environmental Research Institute, MST LUFT-A 96.

Schrader, F. & Brümmer, C. (2014). Land Use Specific Ammonia Deposition Velocities: a Review of Recent Studies (2004–2013). *Water Air Soil Pollut* (2014) 225:2114, DOI 10.1007/s11270-014-2114-7.

Simpson D., Fagerli H., Jonson J.E., Tsyro S., Wind P., Tuovinen J.-P. (2003). Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe, Part I, Unified EMEP model description, EMEP Report 1/2003, Norwegian Meteorological Institute.

Sommer, S.G., Østergård, H.S., Løfstrøm, P., Andersen, H.V., Jensen, L.S. (2009). Validation of model calculation of ammonia deposition in the neighbourhood of a poultry farm using measured NH₃ concentrations and N deposition, - *Atmospheric Environment* (43), pp. 915-920.

Skamarock, W. C., J. B., Klemp, J. Dudhia, D. O., Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers (2008). A Description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech Note NCAR/TN-475+STR, 113p. doi:10.5065/D68S4MVH.

Wang, W., Ganzeveld, L., Rossabi, S., Hueber, J. and Helmig, D. (2020). Measurement report: Leaf-scale gas exchange of atmospheric reactive trace species (NO₂, NO, O₃) at a northern hardwood forest in Michigan. *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 11287–11304, 2020, <https://doi.org/10.5194/acp-20-11287-2020>.

WRF. <https://ral.ucar.edu/solutions/products/weather-research-and-forecasting-model-wrf>.