Eksplosiv atmosfære i kloakker

DANVA
Dansk Vand- og
Spildevandsforening

DANVA
RAPPORT NR. 77, September 2008

Titel: Eksplosiv atmosfære i kloakker - Risikoanalyse

Udgiver: DANVA
Vandhuset
Danmarksvej 26
8660 Skanderborg

ISBN: 87-90455-79-7

Udarbejdet af:
Jacob Søndergaard, Rambøll Danmark A/S
Hans Wilhelm Rasmussen, Rambøll Danmark A/S
Ib Winther Hamborg, Rambøll Danmark A/S

Finansiering:
Vejledningen er finansieret af:
Københavns Energi,
Aalborg Kommune,
Århus Kommune,
Odense Vandselskab,
Fredericia kommune,
Helsingør Kommune,
DANVA

September 2008

Indholdsfortegnelse

1.	**Indledning**	**1**
1.1	Omfang af analysen	1
1.2	Baggrund	1
1.2.1	ATEX lovgivningen	1
1.2.2	Generelt omkring zoneklassificering	2
1.3	Fremgangsmåde ved analysen	4
1.3.1	Rapportens opbygning	8
2.	**Sammenfatning og konklusion**	**9**
3.	**Stoffer og processer i kloaksystemer**	**11**
3.1	Stoffer der kan tilføres kloakker	11
3.1.1	Industri og processpildevand	12
3.1.2	Stoffer der kan tilføres ved uheld fra omgivelserne	13
3.2	Stoffer der dannes ved kloakprocesser	14
3.2.1	Biologiske nedbrydningsprocesser i kloakken	15
3.2.2	Anoxiske processer	16
3.2.3	Anaerob nedbrydning	16
3.2.4	Betingelser for biovækst og –omsætning i kloakken	19
3.2.5	Omfanget af svovlbrintedannelse	21
3.2.6	Omfanget af metandannelse	24
3.2.7	Stofferne i kloakkens luft	26
3.3	Sammenfatning omkring stoffer og processer i kloaksystemet	29
4.	**Beskrivelse af kloaksystemer**	**32**
4.1	Generelle forhold ved det kommunale hovedkloaksystem	32
4.2	Separat spildevandssystem	33
4.2.1	Gravitationsledninger	34
4.2.2	Dykkede spildevandsledninger	34
4.2.3	Pumpestationer	35
4.2.4	Trykledninger og oppumpningsbrønde	36
4.3	Separate regnvandssystemer	37
4.3.1	Gravitationsledninger med nedgangsbrønde og rendestensbrønde	37
4.3.2	Pumpestationer, trykledninger og oppumpningsbrønde	38
4.3.3	Regnvandsbassiner	38
4.3.4	Olie- og benzinudskillere og udløbsledninger	38
4.4	Fælleskloaksystem	39
4.4.1	Gravitationsledninger med nedgangsbrønde og rendestensbrønde	40
4.4.2	Dykkede fællesledninger	40
4.4.3	Pumpestationer, trykledninger og oppumpningsbrønde	41
4.4.4	Overløbsbygværker	41
4.4.5	Sparebassiner på fællesledninger.	41
4.4.6	Riste- og sandfangsbygværker på fællesledninger	42
4.5	Sammenfattende vurdering af opholdstid, iltningsforhold og sedimentdannelse for kloaksystemets komponenter	44

5. Erfaringer fra drift af kloaksystemer 47
5.1 Registreringer på bærbare Ex-målere 47
5.2 Registreringer på stationære Ex-målere 48
5.3 Forekommer gaseksplosioner i kloaksystemet? 48
5.4 Hvor i kloaksystemet vurderes at være størst risiko for eksplosion? 48
5.5 Forslag til at reducere eksplosionsrisikoen i de kommunale kloaksystemer 49
5.6 Sammenfatning af driftserfaringer 49

6. Risikovurdering og zoneklassificering 50
6.1 Zoneklassificering af kloaksystemets komponenter 50
6.2 Specielle forhold omkring industrispildevand 54
6.3 Muligheder for nedklassificering 56
6.4 Sammenligning med udenlandske vejledninger 57

7. Referencer 60

1. Indledning

Dansk Vand- og Spildevandsforening (DANVA) ønsker, at der udarbejdes en vejledning, som dækker ATEX lovgivningens krav i forhold til offentlige kloakker i Danmark. DANVA ønsker, at vejledningen skal tage udgangspunkt i, at risikoanalyser er afgørende for zoneklassificeringen.

Denne rapport præsenterer en risikoanalyse af forekomst af eksplosiv atmosfære i offentlige kloaksystemer som grundlag for zoneklassificering. Med denne risikoanalyse som grundlag udarbejdes efterfølgende en DANVA vejledning i ATEX og kloakker.

1.1 Omfang af analysen

Analysen omfatter kun det kommunale hovedkloaksystem, og derfor ikke dele indenfor renseanlæggenes skel og dele indenfor de tilsluttede ejendommes skel.

Følgende kloaksystemer er således *ikke* omfattet af nærværende analyse:

- Kloaksystemer på ejendomme med eget renseanlæg og direkte udledning til recipient eller nedsivningsanlæg.
- Kloaksystemer med samletanke på ejendomme uden udledning til offentlig kloak eller recipient, men med tømningsordning til offentligt renseanlæg.
- Fedt- og olieudskillere, septiktanke eller pumpebrønde på ejendomme med stikledning til offentlig kloak.

1.2 Baggrund

I det følgende gives en kort beskrivelse af baggrunden for arbejdet, nemlig ATEX lovgivningen og principper omkring zoneklassificering.

1.2.1 ATEX lovgivningen

Arbejde i virksomheder med anlæg eller systemer, hvor der forekommer brandbare eller eksplosionsfarlige stoffer, reguleres blandt andet af arbejdsmiljøbestemmelserne givet i EU direktivet 1999/92/EF, kaldet ATEX ”anvender” direktivet (ATEX er en forkortelse af det franske udtryk ATmospheres EXplosibles). Der findes også et andet ATEX direktiv (”produkt” direktivet), som stiller krav til produkter/udstyr, der skal anvendes i eksplosiv atmosfære. Når der i det følgende nævnes ATEX direktivet henvises alene til ”anvender” direktivet.

I Danmark er ATEX direktivet indført via Indenrigs- og Sundhedsministeriets Bekendtgørelse nr. 590 og via Arbejdstilsynets Bekendtgørelse nr. 478.
ATEX direktivet pålægger alle virksomheder at gennemgå virksomhedens aktiviteter med henblik på at identificere, klassificere og afmærke de eksplosionsfarlige områder på virksomheden. Dvs. områder hvor der kan forekomme eksplosiv atmosfære i større eller mindre omfang. Denne pligt suppleres i direktivet af en pligt til at udarbejde et eksplosionssikringsdokument (som fremover skal indgå som en del af den i forvejen lovpligtige arbejdspladsvurdering, APV, under navnet "udvidet APV for arbejde i eksplosiv atmosfære"). Dette dokument dokumenterer overordnet, at områder, hvor der dannes eksplosiv atmosfære, indrettes således, at arbejdet kan udføres uden risiko, og at der føres passende tilsyn.

Mere specifikt dokumenterer eksplosionssikringsdokumentet at:

- Eksplosionsrisiciene er blevet kortlagt og vurderet.
- Der på arbejdspladsen træffes tilstrækkelige foranstaltninger til opfyldelse af formålene med ATEX direktivet.
- Zoneklassificeringen er foretaget.
- Udformningen, anvendelsen og vedligeholdelsen af arbejdssteder og arbejdsudstyr, herunder advarselsanordninger, er sikkerhedsmæssigt forsvarlig.
- Der er truffet foranstaltninger til sikker brug af arbejdsudstyr.

For at hjælpe virksomheder med at forstå og efterleve lovkravene, og fremstille den krævede dokumentation i form af et eksplosionssikringsdokument, er der udarbejdet en række autoritative vejledninger. Blandt disse kan nævnes EU Kommissionens officielle vejledning, der har dannet grundlag for det danske Arbejdstilsyns vejledning (C.0.9).

Arbejdstilsynets vejledning er generel i sin opbygning og henvender sig ikke til en specifik branche eller virksomhedstype. Dog er der i regi af Branche Arbejdsmiljø Rådene udarbejdet en række ATEX vejledninger for specifikke industrier, herunder fødevare-, træ og møbel-, jern og metal-, maskin- og autolakeringsindustrien. Lignende vejledninger er under udarbejdelse for f.eks. laboratorier.

1.2.2 Generelt omkring zoneklassificering

Zoneklassificering (også kaldet områdeklassificering) er et værktøj til at inddele fysiske områder med produktionsanlæg (herunder må indregnes komponenter i spildevandssystemer) i grupper efter sandsynligheden for at der potentielt kan forekomme eksplosiv atmosfære.

Når man skal udarbejde zoneklassifikation for et fysisk område, skal der foretages en analyse baseret på metoderne givet i EN 60079-10 (brandfarlige gasser, dampe og tåger), ref. /12/, og EN 61241-10 (brandfarligt støv), ref. /13/.

Bemærk, brandbart støv ventes ikke at forekomme i signifikant omfang i kloaksystemer, og er kun medtaget her for at give en dækkende forklaring på begrebet zoneklassificering. I kloaksystemer kan analysen fokuseres på forekomst af brandfarlige gasser, tåge og dampe.

Som grundlag for analysen skal der samles data om potentielt brandbare og eksplosive stoffer (dækkende alle driftsfaser og operationstilstande for anlæg og processer i området), og potentielle kilder til frigivelse af brandbare stoffer (i.e. udslipskilder) skal identificeres.

Der foretages en analyse af forskellige udslipsscenarier, hvor der vurderes forventet sandsynlighed for forekomst og varighed af eksplosiv atmosfære. Der skal dog ses bort fra eventuelle muligheder for katastrofale udslip af brandbart stof, som f.eks. ved rør- eller beholderbrud, ref. /12/, der kun forventes at forekomme i meget sjældne tilfælde i forbindelse med større uheld.

Specifikt citeres fra standarden, at "… den gælder ikke for: … katastrofale fejl, der ligger ud over det koncept for abnormitet, som denne standard drejer sig om". Hertil knytter standarden følgende note: "Katastrofale fejl gælder i denne sammenhæng f.eks. brud på en bearbejdningsbeholder eller en rørledning samt hændelser, som ikke kan forudses." Det er således hævet over enhver tvivl, at hændelser med udslip af f.eks. brandbar væske fra en industrivirksomhed hører under denne kategori (der ikke skal zoneklassificeres for), med mindre at det er normen, at der sker betydelige udslip af brandbar væske til kloakken.

Sandsynligheden for forekomst af eksplosiv atmosfære vil afhænge af anlæggets konstruktion samt brugs- og vedligeholdelsesmåde. Varigheden af en eksplosiv atmosfære vil (specielt for gasser, dampe og tåger) afhænge betydeligt af omfanget af ventilation. Ventilationens indvirkning på koncentration af brandbart støv vil normalt negligeres, i det regulering af brandbart støv i f.eks. produktionslokaler håndteres gennem rengøring, dog skal der tages hensyn til indvirkning fra systemer til transport af støv, såsom pneumatisk transport o.l.

Analysens resultater leder frem til at der kan defineres farlige zoner hvor der kan forventes at forekomme eksplosiv atmosfære. De følgende definitioner anvendes til at klassificere disse zoner:

Zone 0: Områder, hvor der uafbrudt eller i lange perioder eller ofte forekommer eksplosiv atmosfære bestående af en blanding af brændbare stoffer i form af gas, dampe eller tåger med luft.

Zone 1: Områder, hvor det kan forventes, at der ved normal drift lejlighedsvis forekommer eksplosiv atmosfære bestående af en blanding af brændbare stoffer i form af gas, dampe eller tåger med luft.

Zone 2: Områder, hvor det ikke forventes, at der ved normal drift forekommer eksplosiv atmosfære bestående af en blanding af brændbare stoffer i form af gas, dampe eller tåger med luft, eller hvis dette sker, da kun i korte perioder.

Zone 20: Område, hvor der uafbrudt eller i lange perioder eller ofte forekommer eksplosiv atmosfære i form af en sky af brændbart støv i luft.

Zone 21: Område, hvor det kan forventes, at der ved normal drift lejlighedsvis forekommer eksplosiv atmosfære i form af en sky af brændbart støv i luft.

Zone 22: Område, hvor det ikke forventes, at der ved drift forekommer eksplosiv atmosfære i form af en sky af brændbart støv i luft, eller hvor forekomsten, hvis det sker, kun er af kort varighed.

Da ventilationens omfang indgår som en direkte faktor i beregning af udbredelsen af en given zone (for gasser, dampe eller tåger) kan man anvende en kraftig ventilation til at sikre en lav zoneklassifikation, eller helt undgå zoneklassificering, hvis ventilationen er kraftig nok. Det er dog dyrt at nedklassificere zoner på denne måde, da anlægget har en lang forventet levetid og ventilationen skal opretholdes i hele levetiden.

Et bedre alternativ, som også lovgivningsmæssigt kræves tilstræbt, er at sikre at anlægget er fri for udslipskilder under almindelige driftsforhold, og at udslip ved driftsforstyrrelser eller uheld minimeres i frekvens og i omfang. Derved kan ventilationens omfang holdes nede på et rimeligt niveau.

Følges denne anbefaling leder det normalt frem til at anlægget kan klassificeres i laveste zoneklasse (zone 2, for gasser, dampe eller tåger), eller i bedste fald, helt kan undgå klassificering.

Udslips- og ventilationsberegningerne, der leder frem til zoneklassificeringen, baseres på dels på fysiske modeller for udslip og dels på simple standardberegninger af ventilationens indvirkning på udslip (gas, dampe eller tåger), efter EN 60079-10 ref. /12/.

Komplikationer i beregningerne kan opstå hvor hulstørrelser for f.eks. flangelæk o.l. ikke er kendte, og der ikke findes vejledning at hente i standarder. Her må der i stedet anvendes erfaring og fysisk viden omkring sivende udslip, som typisk kun er tilgængelig hos eksperter indenfor feltet.

1.3 Fremgangsmåde ved analysen

I det følgende beskrives den anvendte risikoanalysemetode, der anvendes for at danne grundlag for korrekt zoneklassificering af kloaksystemer. Figur 1-1 nedenfor skitserer den overordnede fremgangsmåde i zoneklassificering baseret på risikoanalyse. Analysen i denne rapport følger princippet i denne fremgangsmåde.

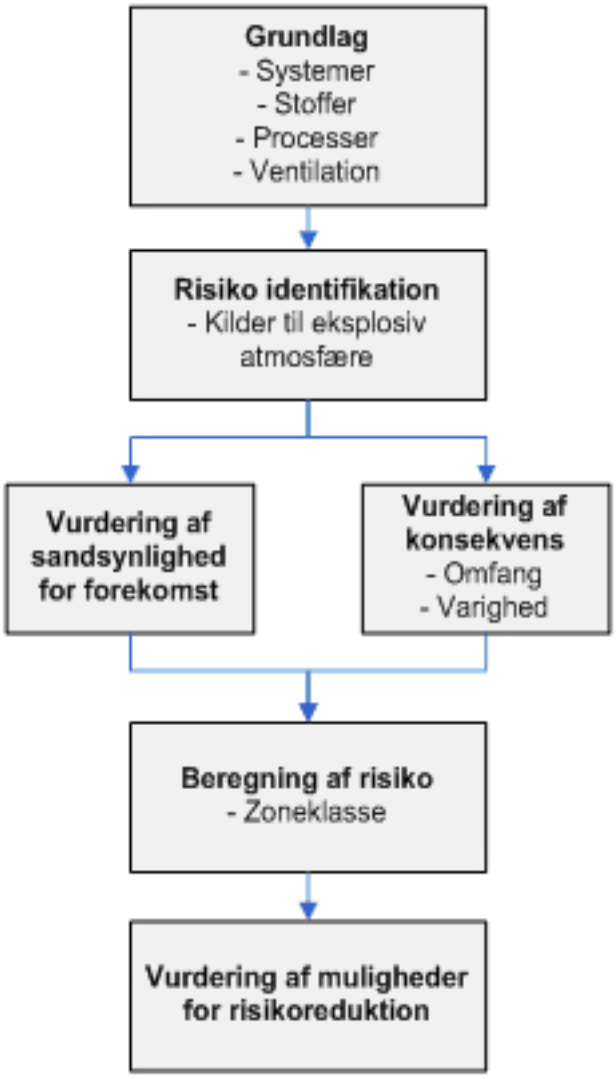
I opstilling af grundlaget for analysen forsøges foretaget en passende opdeling af afløbssystemet i repræsentative delsystemer, således at analysen dækker systemer, der med passende nøjagtighed kan relateres i omfang, indretning og stand til de forskellige kloaksystemer, der findes i Danmark.

Det øvrige grundlag for analysen er data og viden om kloakprocesser (dækkende alle driftsfaser og operationstilstande af kloaksystemer) og om de potentielt brandbare og eksplosive stoffer, der kan forekomme i kloakker, således at de potentielle kilder til forekomst af brandfarlige stoffer kan identificeres.

Data og viden opnås gennem litteraturstudier af relevant litteratur fra hele verden og dels gennem interview med driftspersonale fra udvalgte afløbsafdelinger i kommuner i byen og på landet. Interviewene afdækker praktiske forhold omkring kloakkernes udformning samt klarlægger driftspersonalets erfaringer med gas i kloakanlægget, herunder hvor ofte man har udslag på gasdetektor (explocimeter) ifm. arbejdets udførsel.

Med dette grundlag kan der foretages en grundig identifikation af de forskellige scenarier, der involverer dannelse af potentielt eksplosiv atmosfære i kloaksystemer, samt en identifikation af i hvilke dele af afløbssystemet disse scenarier kan optræde.

For de enkelte scenarier på de enkelte dele af afløbssystemet vurderes da den forventede sandsynlighed for forekomst, samt omfang og varighed, af den eksplosive atmosfære. Der ses dog bort fra eventuelle muligheder for katastrofale udslip ved større uheld, jf. afsnit 1.2.2 ovenfor.



Figur 1-1 Fremgangsmåde for risikoanalysen der giver grundlaget for zoneklassificering af kloakker

Sandsynligheden for forekomst samt omfang og varighed af eksplosiv atmosfære vil afhænge af anlæggets konstruktion og brugs- og vedligeholdelsesmåde. Specielt vil omfanget af ventilation have direkte indflydelse på muligheden for dannelse af eksplosiv atmosfære. Disse forhold medtages da i analysen, der leder frem til en samlet vurdering af risikoen for dannelse af eksplosiv atmosfære i de enkelte dele af afløbssystemet.

Risikovurderingen udmønter sig i en overordnet zoneklassificering, jf. afsnit 1.2.2 ovenfor, for kloaksystemet.

Zoneklassificeringen lægger restriktioner på hvilket fast og mobilt udstyr (der kan udgøre potentielle antændelseskilder) som må tages i brug, samt hvilket arbejde der må

udføres i de klassificerede områder. Da arbejde med mobilt udstyr ofte involverer øget ventilation i kloaksystemet (idet dæksler åbnes til systemet), er der mulighed for midlertidigt at nedklassificere dele af kloaksystemet mens arbejde pågår. Derved vil det formentligt kunne tillades at anvende almindeligt arbejdsudstyr, selvom området normalt er klassificeret.

Analysen afdækker de overordnede forhold, der skal være til stede før en midlertidig nedklassificering kan gennemføres herunder krav til ventilation, måling af forekomst af gas mv.

Analysens resultater præsenteres i skemaer og tabeller, der gør det muligt at uddrage information om minimumskrav til zoneklassificering for de analyserede delsystemer.

I den kommende DANVA vejledning planlægges det, at der indgå konkrete eksempler på beregning af minimumskrav til omfanget af naturlig/mekanisk ventilation, der kan sikre en midlertidig eller permanent nedklassificering af delkomponenterne i et kloaksystem.

Det bemærkes, at der er ikke foretaget en decideret tændkildeanalyse, da zoneklassificeringen er uafhængig af forekomst af mulige tændkilder. En overordnet tændkildeanalyse for kloaksystemer tænkes udført som en del af det senere arbejde med udarbejdelsen af en DANVA vejledning i ATEX og kloakker.

1.3.1 Rapportens opbygning

Rapportens struktur er som følger:

- Kapitel 2 indeholder en sammenfatning og konklusion på analysen.
- Kapitel 3 indeholder en gennemgang af stoffer og processer, der kan forekomme i kloaksystemer.
- Kapitel 4 indeholder en karakterisering af kloaksystemets komponenter, samt en vurdering af hvilke stoffer og processer der med en vis sandsynlighed kan forekomme i de forskellige komponenter.
- Kapitel 5 indeholder en sammenfatning af erfaringer omkring eksplosionsfare i kloakker fra drift af kloaksystemer opnået på basis af interviews.
- Kapitel 6 indeholder en sammenfattende risikovurdering og zoneklassificering for forekomst af eksplosiv atmosfære i kloaksystemers komponenter.

2. Sammenfatning og konklusion

Denne rapport præsenterer en risikoanalyse af forekomst af eksplosiv atmosfære i offentlige kloaksystemer som grundlag for zoneklassificering. Med denne risikoanalyse som grundlag udarbejdes efterfølgende en DANVA vejledning i ATEX og kloakker.

I rapporten præsenteres en analyse af de stoffer og processer, der kan forekomme i kloaksystemer. Herfra konkluderes, at

- Der skal normalt ikke zoneklassificeres for brandbare stoffer, der kan tilføres kloakker fra f.eks. industrivirksomheder, med undtagelse af benzin- og olieudskillere.

- Metan er den eneste gas, der dannes i kloaksystemet, som potentielt kan forekomme i antændelige koncentrationer i kloakker.

Der er endvidere lavet en karakterisering af kloaksystemets komponenter, samt en vurdering af hvilke stoffer og processer, der med en vis sandsynlighed kan forekomme i de forskellige komponenter. Der er på baggrund af dette givet sammenfattende vurdering af opholdstid, iltningsforhold og sedimentdannelse for de enkelte dele af kloaksystemet.

Som en del af arbejdet er indsamlet erfaringer omkring eksplosionsfare i kloakker fra drift af kloaksystemer opnået på basis af interviews. Ud fra disse erfaringer vurderes der ikke at være risiko for gaseksplosion i et normalt fungerende kloaksystem, med mindre der udledes større mængder brandfarlige væsker til kloakken ved uheld.

Der er foretaget en risikovurdering for forekomst af eksplosiv atmosfære, og derudfra er der foretaget en overordnet zoneklassificering for kloaksystemers komponenter. Resultatet af zoneklassificeringen er, at der er fire komponenttyper i det kommunale hovedkloaksystem, hvor det vurderes, at der kan forekomme eksplosiv atmosfære i et omfang, der kræver zoneklassificering:

- Gamle lukkede bassiner uden skyllefunktion og med ringe ventilation (fælles systemer)
- Uventilerede brønde omkring dykkede ledninger (i fælles systemer eller separate spildevandssystemer)
- ”Døde” ledninger (i fælles systemer eller separate spildevandssystemer)
- Benzin- og olieudskillere (i separat regnvandssystemer)

Omfanget af den eksplosive atmosfære vurderes i alle tilfælde at være begrænset til luftfasen i den enkelte komponent, og eventuelt til nærliggende bygværker (specielt for dykkede og ”døde” ledninger), hvis disse ikke er ventilerede.

I den sidste del af rapporten gennemgås på overordnet vis forskellige muligheder for midlertidig eller permanent nedklassificering af de zoneklassificerede områder. Hovedprincipperne er: 1) fjernelse af kilden til eksplosiv atmosfære, 2) øget ventilation.

Afsluttende er der foretaget en sammenligning med krav givet i udenlandske vejledninger. Det er fundet, at den tyske vejledning på området generelt overvurderer risikoen for forekomst af eksplosiv atmosfære, hvis den anvendes på komponenter i det danske kloaksystem. Afvigelsen i vurderingerne kan henledes til, at der antages en væsentligt anderledes normaltilstand i det tyske kloaksystem. Specielt, så er det en grundlæggende forudsætning for zoneklassificeringen af det tyske kloaksystem, at der her normalt må forventes at forekomme brændbare væsker.

Sammenfattende konkluderes det ud fra analysen i denne rapport, at

- Der er kun ganske få dele af det kommunale hovedkloaksystem, hvor der er risiko for forekomst af eksplosiv atmosfære i et omfang der kræver zoneklassificering.

- De primære sikkerhedsbarrierer mod dannelse af eksplosiv atmosfære er:

    - Undgåelse af industriel udledning af brandbare stoffer i betydelige mængder.

    - Ventilation af kloaksystemer i videst muligt omfang, med henblik på primært at undgå anaerobe forhold, og sekundært at bortventilere kloakgasser.

    - Undgåelse af dyb sedimentdannelse og lange opholdstider i nogen dele af kloaksystemet.

3. Stoffer og processer i kloaksystemer

I kloaksystemer forekommer mange forskellige stoffer i stærkt varierende mængder og relativ sammensætning. I det følgende forsøges på overordnet vis skitseret de væsentligste forhold omkring forekomsten af forskellige stoffer i danske kloaksystemers med henblik på i den efterfølgende risikoanalyse at kunne udpege de stoffer, der kan være kritiske i forhold til forekomst af eksplosiv atmosfære.

Der lægges i beskrivelsen vægt på identifikation af brandbare[1] stoffer og på en karakterisering af de gasdannede processer, der kan forekomme i kloakker, og som under de rette forhold kan lede til dannelse af eksplosiv atmosfære.

I det efterfølgende kapitel 4 beskrives kloaksystemets komponenter, og der identificeres de steder i kloaksystemerne, hvor det kan forventes at de nævnte stoffer, og gasdannende processer kan forekomme i kritiske mængder.

Overordnet set er der to årsager til at brandbart stof kan forekomme i kloakker, enten er det tilført via kloakkens åbninger, f.eks. sammen med spildevandet, eller også dannes det ved processer i kloakken. Disse årsager, og de stoffer der kan forekomme på grund heraf, er beskrevet i særskilte afsnit i det følgende.

3.1 Stoffer der kan tilføres kloakker

Spildevand i kommunale kloakker består af vand med affaldsstoffer fra husholdninger, institutioner og industri. Endvidere tilføres kommunale kloakker al den opsamlede nedbør og andet, der afstrømmer fra befæstede arealer, såsom faste overflader som veje, tage mv. Regnvandet kan eventuelt føres i separat system, jf. beskrivelsen af kloaksystemets komponenter i kapitel 4.

Spildevandets sammensætning varierer fra sted til sted, men består normalt af over 99 % vand, ref. /7/, og indeholder derudover betydelige mængder af organisk stof, men også levende organismer (såsom bakterier, parasitter, vira mv.), samt uorganiske stoffer. Stofferne kan optræde både som opløst eller fast stof, og deres karakter kan ændre sig både fysisk og kemisk gennem spildevandssystemet, blandt andet ved afdampning og biologisk omsætning, som det beskrives i afsnit 3.2, nedenfor.

[1] Ved brandbare stoffer forstås i denne rapport stoffer som enten er brandbare gasser eller væsker, der har tilstrækkeligt lavt flammepunkt til at kunne antændes ved de temperaturer stofferne kan udsættes for i kloakken. Det kan f.eks. være metan (gas) eller brandbare væsker, som benzin eller organiske opløsningsmidler mv.

3.1.1 Industri og processpildevand

Spildevand fra industrien kan indeholde en lang række forskellige stoffer, der i sig selv kan være brandbare, eller som ved processer i kloakken kan reagere, eller omsættes biologisk, så der dannes brandbare gasser.

Specielt fødevarevirksomheder såsom slagterier, bryggerier mv. kan udlede store mængder af let omsætteligt organisk materiale til kloakken. Er den udledte biomasse sulfatholdig, kan der under iltfattige forhold forekomme kraftigt dannelse af svovlbrinte i kloakken, jf. beskrivelsen af processer i kloakken i afsnit 3.2, nedenfor.

Andre industrier, herunder virksomheder indenfor den kemiske procesindustri, kan udlede stoffer der i sig selv er brandfarlige, og som kan afgive dampe, der er brandbare. Udledning fra sådanne virksomheder er skarpt reguleret, og der er udarbejdet en dækkende vejledning på området, se ref. /10/. I vejledningen anføres at (citat fra ref. /10/):

De elektriske installationer i pumpestationer og renseanlæg mv. kan på trods af sikring give anledning til gnistdannelse, og det må derfor sikres, at der ikke tilføres eksplosionsfarlige luftarter i de tilknyttede luftrum.

Der må derfor stilles krav om, at vandet ikke indeholder højere koncentrationer af flygtige eksplosionsfarlige stoffer som f.eks. organiske opløsningsmidler, benzin og olie.

Endvidere giver vejledningen en fremgangsmåde til vurdering af, om flygtige stoffer kan give anledning til eksplosionsfare, se nærmere herom i vejledningens (ref. /10/) bilag 5 samt afsnit 6.2 i denne rapport.

Udslip fra en industrivirksomhed af brandfarlige stoffer i større mængder, som kan have betydning for eksplosionsforhold i kloakker, forventes derfor kun at kunne forekomme som følge af uheld på en af disse virksomheder.

Som specialtilfælde nævnes, at der fra lossepladser kan udledes perkolat til kloakken. Hvis lossepladsen er gasproducerende, kan dette perkolat indeholde biogas (som hovedsageligt består af metan). Mængden af gas, der kan tilføres kloakken ad denne vej afhænger af mængden af gas optaget i vandet, og af hvorvidt perkolatet beluftes, inden det føres til kloakken. Perkolatet kan også indeholde en lang række andre stoffer, herunder let omsætteligt organisk materiale, men også flygtige organiske forbindelser, f.eks. methyl mercaptan. Det er således muligt, at biogas tilføres kloakken ad denne vej, og derved er det potentielt muligt at gassen kan akkumulere og udgøre en eksplosionsrisiko. Det må derfor bemærkes, at der må stilles samme krav til perkolat fra lossepladser, som til udledning fra industrianlæg i øvrigt, se ovenfor.

3.1.2 Stoffer der kan tilføres ved uheld fra omgivelserne

Idet kloakker har åbninger til omgivelserne, kan der relativt let tilføres brandfarlige stoffer, der ikke var tiltænkt at havne i kloakken.

Eksempler er opløsningsmidler, benzin (inkl. diesel og andre oliedestillater), LPG (flydende gas, såsom propan) mv. Tilførsel kan f.eks. ske ved at biler, lastbiler eller tankbiler lækker – typisk ved færdselsuheld. Ligeledes kan der ske gasindsivning fra nedgravede rør, der f.eks. lækker naturgas, bygas, LPG mv., samt gasindsivning fra jorden ved gasproducerende lossepladser.

Som et eksempel på sidstnævnte kan nævnes et tilfælde fra 1998 i Nuneaton, Warks, England, hvor det blev konstateret at metangas i en koncentration på op til 3,3 % havde trængt ind i en kloak fra en nærliggende losseplads, ref. /9/. Et andet eksempel er, at der i 1982 i Morley, Leeds, England, skete et uheld hvor metangas blev antændt i en kloak under en losseplads, og to unge drenge kom til skade, ref. /9/.

Tilførsel af sådanne stoffer er forårsaget af, at der sker et uheld, og deres forekomst i kloakken er derfor *meget sjælden*, og tilførselsstedet er oftest uforudsigeligt. Dermed ikke sagt, at der ikke kan forekomme uheld, da der findes en del eksempler på brande/eksplosioner i kloakker af denne årsag (faktisk vurderes det, på baggrund af de indsamlede cases, at brandfarlige stoffer tilført ved uheld er den altdominerende årsag til brand og eksplosion i kloakker).

Der er steder, f.eks. ved tankstationer, hvor der er en forhøjet risiko for, at der kan tilføres brandfarlige stoffer til kloakken ved uheld. På sådanne steder er der typisk krav om at overfladevandet føres gennem en olieudskiller, før det ledes til kloakken. Dette mindsker risikoen væsentligt for at brandfarligt stof tilføres kloakken ad denne vej, givet at følgende betingelser er opfyldt: 1) olieudskilleren er korrekt dimensioneret, 2) den vedligeholdes (dvs. tømmes/renses når det er nødvendigt).

Er disse betingelser ikke opfyldt, kan det let ske, at der ved spild tilføres brandbare stoffer til kloaksystemet. Et eksempel på dette er et nyligt uheld på en tankstation i Hartford, CT, USA den 26. marts 2007, hvor en bil ved en fejl bakkede ind i en benzinstander og omkring 380 liter benzin lækker ud i kloakken (et kombineret kloak- og regnvandssystem), hvor en uidentificeret antændelseskilde forårsagede antændelse og efterfølgende eksplosion i kloaksystemet, der medførte, at der opstod en brand i bagelshoppen i naboejendommen til tankstationen.

Ved eksplosionen blev kloakdæksler i området blæst af. Forventeligt ville den undslupne mængde benzin have været mindre, men af uforklarede årsager virkede det automatiske sikkerhedssystem ikke. Systemet skulle ved rørbrud have stoppet pumpen og lukket ventiler på røret til benzinstanderen.

Et andet eksempel på en eksplosion i et kloaksystem, hvor der blev foretaget ledningsarbejde, refereres her. Kilde: ref. /18/.

Eksplosionen blev forårsaget af en af et læk i en jernbanevogn, hvorved ca. 25.000 liter benzin blev ledt til det kommunale kloaksystem og blev antændt af en cigaret fra en arbejder, som var på vej ned i en brønd ca. 1 km fra jernbanevognen. Eksplosionen medførte opskydning af dæksler i en 400 meter ledningsstrækning og adskillige skader på stik og bygninger. En person blev dræbt og to sårede ved eksplosionen.

Det er således givet – selv om det er sjældent det sker – at der på et tidspunkt vil tilføres brandfarligt stof til kloakken på grund af uheld. Ved zoneklassificering kan der dog ses helt bort fra disse eventuelle muligheder for katastrofale udslip ved større uheld, jf. afsnit 1.2.2 ovenfor.

Er der flow i kloakken, så vil stofmængden udjævnes og koncentration aftage hen gennem kloakken, idet stoffet føres med kloakvandet. Er der intet eller kun lidt flow i kloakken, kan der ske en lokal akkumulering af brandbare dampe i kloakken. Den afdampede gas vil blande sig med luften i kloakken og langsomt tyndes ud, idet gassen siver ud i det fri gennem kloakkens åbninger (hvis der ikke først sker antændelse af dampene).

En del opløsningsmidler og oliedestilater (herunder benzin) afgiver tunge dampe, dvs. tungere end atmosfærisk luft. Disse dampe vil forventeligt have en længere opholdstid i kloakken, end hvis en tilsvarende mængde let gas (f.eks. metan) blev frigivet i kloakken.

3.2 Stoffer der dannes ved kloakprocesser

I kloakmiljøet er det normalt mikrobiologisk og ikke kemisk omsætning, der dominerer. I kloakken kan der ske en hurtig mikrobiel omdannelse af organisk stof vha. et meget komplekst mikrobiologisk system med et stort antal mikroorganismer.

I det organiske stof, der udgør substratet for mikroorganismerne, findes der et stort antal forskellige fraktioner af mere eller mindre letomsættelige stoffer. Disse stoffer omsætter mikroorganismerne, som en del af deres respiration, til andre stoffer med det formål at optage energi fra omsætningsprocessen.

Dette forløb med biologisk stofomsætning kan beskrives kemisk med redox reaktioner, og det er ud fra sådanne beskrivelser, at der kan dannes et overblik over hvilke stoffer som forbruges og dannes ved mikroorganismernes omsætning. I de følgende afsnit gives et overblik over de vigtigste forhold, der er bestemmende for, at brandbare stoffer (specielt gasser) kan dannes i kloakker ved mikrobiologisk omsætning.

3.2.1 Biologiske nedbrydningsprocesser i kloakken

Kloakken domineres af heterotrofe mikroorganismer, som nedbryder spildevandets komponenter, ref. /4/. Den akkumulerede energi i det organiske stof gøres tilgængeligt for mikrobiologisk omsætning ved nedbrydning gennem oxidering af det organiske stof.

Processerne udføres under redox-betingelser bestemt af tilgængeligheden af en elektronacceptor. Det organiske stof fungerer som elektrondonor. Således kan der opstilles en prioriteret række af iltningstrin relevante for kloakprocesser, se tabel 3.1 nedenfor, svarende til den mest fordelagtige proces, givet tilstedeværelsen af oxidationsmiddel. Prioriteringen følger den mulige mængde Gibbs fri energi, der maksimalt kan frigives, hvis processen forløber.

Proces	Oxidationsmiddel	Reaktionsprodukt
Aerob respiration	O_2	CO_2
Denitrifikation	NO_2^-	N_2
Sulfat reduktion	SO_4^-	H_2S
Metanoganese	CO_2	CH_4

Tabel 3.1 Redox processer (for omsætning af organisk stof i kloakker), deres oxidationsmiddel og primære reaktionsprodukt. Processerne er listet i prioriteret rækkefølge efter maksimal energi der kan frigives (mest energi i øverste række).

De energiproducerende redox-reaktioner, som bakterierne udfører, kaldes respirationsprocesser. Naturens selektion af bakterier tilgodeser ønsket om størst mulig energigevinst, hvorfor prioriteringen i rækkefølgen af oxidationsprocesser givet i tabel 3.1 også gælder, når processerne forløber i biologiske systemer vha. omsætning i bakterier.

Der kan overordnet skelnes mellem tre procesbetingelser, hvad angår iltningsforhold: aerobt (ilt er tilstede), anoxisk (nitrat er tilstede, men ingen ilt), anaerobt (sulfat og/eller CO_2 er tilstede, men hverken ilt eller nitrat tilstede). Omsætningshastigheden under anaerobe forhold er generelt en del langsommere end under aerobe forhold.

Der er forventeligt aerobe forhold i kloaksystemet, hvor der er rimelig kontakt med atmosfærisk luft. Således er gravitationsledninger (dvs. ledninger hvor spildevandet ledes vha. af tyngdekraften) typisk ventileret i en sådan grad, at der er iltede (aerobe) forhold i kloakluften, og dermed også i kloakvandet, ref. /4/.

Ved mikrobiel nedbrydning under iltede forhold produceres ikke brandbare gasser. Derimod kan der i trykledninger, specielt i varme perioder under sommeren, opstå iltfattige eller decideret iltfrie forhold, der muliggør dannelse af brandbare gasser ved mikrobiel omsætning af det organiske stof.

3.2.2 Anoxiske processer

Anoxiske betingelser (dvs. ingen ilt, men nitrat eller nitrit findes) forekommer sjældent i kloakker, ref. /8/. Hvis anoxiske betingelser forekommer, så kan denitrifikationsprocessen forløbe, hvor nitrat gennem flere trin reduceres til nitrogen (N_2), der er en inert gas. Alternativt, kan ammoniak (eller ammonium) oxideres direkte ved reduktion af nitrit til nitrogen.

Der er generelt meget lidt viden publiceret omkring anoxiske processer i kloakker, men det vides (se ref. /4/), at der normalt er et ringe grundlag for opretholdelse af anoxiske processer i kloakker. Dette skyldes at nitrat/nitrit indholdet i spildevandet generelt er lavt, og at den autotrofe biomasse (herunder nitrificerende bakterier) har dårlige vækstvilkår i kloaksystemer, så der sker ingen betydelig nitrifikation i kloakken (dvs. omsætning af ammoniak til nitrat/nitrit under forbrug af ilt), der kunne danne grundlag for senere denitrifikation (anoxisk proces).

Det er ligeledes kendt, at svovlbrintedannelse kan undgås (eller i hvert fald mindskes) ved at tilsætte nitrat til spildevandet, idet de denitrificerende bakterier derved får gode vækstvilkår, ref. /8/. Så givet de rette vilkår (herunder tilstedeværelse af nitrit/nitrat og let omsætteligt organisk stof i substratet) kan der meget vel forekomme anoxiske processer i kloaksystemet.

3.2.3 Anaerob nedbrydning

Nedbrydning under anaerobe forhold vil ikke forløbe i udstrakt grad, før mængden af nitrat/nitrit i spildevandet er tilpas lav, dvs. så længe de denitrificerende bakterier har en energimæssig fordel i konkurrencen med bakterierne, som er aktive under anaerobe forhold.

Under anaerobe betingelser kan både respiration og fermentering medvirke til at udfylde energibehovet for mikroorganismer.

Der er fire biologiske og kemiske hovedstadier i anaerob nedbrydning (se f.eks. ref. /14/):

1. Hydrolyse (kemisk reaktion), hvor komplekse organiske molekyler nedbrydes til simplere sukre, aminosyrer og fede syrer med hydroxyl grupper.

2. Acidogenese (syrestadiet) hvor der sker en videre biologisk nedbrydning gennem fermentering af syrer til simplere molekyler, de flygtige fede syrer (engelsk: Volatile Fatty Acids, VFA), med ammoniak, kuldioxid og brint som biprodukter.

3. Acetogenese, hvor simple molekyler fra acidogenese omsættes yderligere, og der produceres kuldioxid, brint og primært eddikesyre.

4. Metanoganese, hvor der ved bakteriers respiration omsættes primært eddikesyre eller kuldioxid og brint, og herudover dannes metan, kuldioxid og vand.

Det første trin, hydrolysen, foregår alene vha. extracellulære enzymstoffer, der bidrager til spaltning af større molekyler i form af f.eks. suspenderet stof til små bio-omsættelige molekyler. Processen er en rent kemisk spaltning af det partikulære stof under forbrug af vand.

3.2.3.1 Hydrolyse

Hydrolysen er en langsom proces ift. biovækst, hvorfor det virker vækstbegrænsende for bakterierne. Det hydrolyserbare stof er ikke nødvendigvis alt suspenderet stof. Opholdstiden på typisk et par timer til en dag i afløbssystemet gør, at stof som ikke er nedbrydeligt indenfor 1-2 dage er af mindre interesse. Som konsekvens heraf er der ingen grund til at skelne mellem den langsomt nedbrydelige partikulære fraktion af substratet og den inerte fraktion (opløselig eller partikulær).

De vigtige fraktioner i heterotrofiske spildevandsprocesser i kloaksystemer er da, ref. /4/:

- Umiddelbart nedbrydeligt substrat (fermenterbart eller fermenteringsprodukter)
- Hydrolyserbart substrat (i forskellige nedbrydningskategorier, let til svært nedbrydeligt)
- Heterotrofisk aktiv biomasse

Hydrolysen påvirkes (som proces) af en lang række forhold, som:
- iltningsforholdene,
- koncentrationen af hydrolyseproduktet (inhibering ved høje koncentrationer),
- forholdet mellem suspenderet stof og de enzymer, der medvirker ved hydrolysen,
- pH (optimum ligger ved pH 5-7),
- temperatur,
- opholdstid,
- turbulens/opblanding
- mv.

Bakteriernes respirationsprocesser kræver tilstedeværelsen af en endelig elektronacceptor fra elektrontransportkæden (i.e. oxidationsmidlerne i tabel 3.1). Dette er ikke tilfældet for fermentationsprocesserne ved acidogenese og acetogenese, der kan forløbe under anaerobe betingelser uden en endelig elektronacceptor. Dette er fordi det organiske stof gennemgår en balanceret serie af oxidative og reduktive reaktioner, dvs. organisk stof reduceret i et skridt af processen oxideres i et andet, ref. /4/.

3.2.3.2 Syreproduktion og fermentering

Den delvise stofnedbrydning, som sker ved fermenteringsprocesserne, resulterer i organiske stoffer med lav molekylær vægt, f.eks. flygtige fede syrer (engelsk: volatile fatty acids (VFA)) og kuldioxid. Sammenholdt med aerob respiration er fermentering ineffektivt energimæssigt set. Dog kan fermenteringsprodukterne til en vis grad anvendes af sulfat-reducerende bakterier, der anvender sulfat som den afsluttende elektronacceptor. I tilfælde af mangel på sulfat, så kan metanogene bakterier anvende fermenteringsprodukterne, til produktion af metan som slutprodukt.

Der produceres brint (hydrogen) både af de fermative bakterier og de syreproducerende bakterier. Ved lave brintkoncentrationer (brinttryk) vil der dannes brint, kuldioxid og eddikesyre under nedbrydningen af det organiske stof, men ved høje brintkoncentrationer dannes ethanol, butylsyre og propionsyre i stedet for eddikesyren. Disse stoffer kan nedbrydes yderligere, men ved høje brintkoncentrationer opkoncentreres stofferne, hvilket kan bevirke, at der sker en akkumulering af organiske syrer og en sænkning af pH.

Der vil aldrig kunne produceres brint i signifikante koncentrationer, som kan frigives til kloakkens luftfase. I stedet vil den producerede brint omsættes til metan, som det beskrives nedenfor.

3.2.3.3 Sulfatreduktion og metanoganese

Under anaerobe betingelser er det normalt produktion af metan og kuldioxid, der er sluttrinnet for mineraliseringsprocessen af organiske stoffer. Metanproduktionen falder dog drastisk, hvis der er høje koncentrationer af sulfat i substratet. Dette skyldes ikke, at sulfat har en toksisk effekt på de metanproducerende bakterier, men derimod på grund af en simpel substratkonkurrence mellem de metanproducerende bakterier og de sulfatreducerende bakterier, ref. /15/, som producerer svovlbrinte.

De sulfatreducerende bakterier og de metanproducerende bakterier er to grupper af bakterier, der begge omsætter eddikesyre, og da de sulfatreducerende processer energimæssig set er bedre, favoriseres de sulfatreducerende bakterier, ref. /4/ og /15/. De sulfatreducerende bakterier er ydermere mere robuste end de metanproducerende bakterier. f.eks. kan de overleve indenfor et bredere pH-interval, ref. /15/.

Der er to veje til metandannelsen, enten via brint eller via eddikesyre. Visse af de metanogene bakterier anvender eddikesyre og andre (de kemoautotrofe) bakterier anven-

der kuldioxid og brint, til dannelse af metan. De sidstnævnte vurderes at være kilde for op til 75 % af den producerede metan, ref. /6/.

Da metandannelse er en del af det sidste trin ved redoxreaktionerne ifm. biologisk omsætning af organisk materiale, frigives metan alle steder, hvor der sker en total anaerob udrådning af organisk materiale, som f.eks. på bunden af søer og i moser.

Det er ligeledes velkendt, at der findes metanogene zoner i grundvandsedimentet, hvor metanen specielt findes ved overgangszoner mellem aerobe og anaerobe forhold. Flere tilfælde med metangas eksplosioner er kendt under boring efter grundvand, ref. /9/

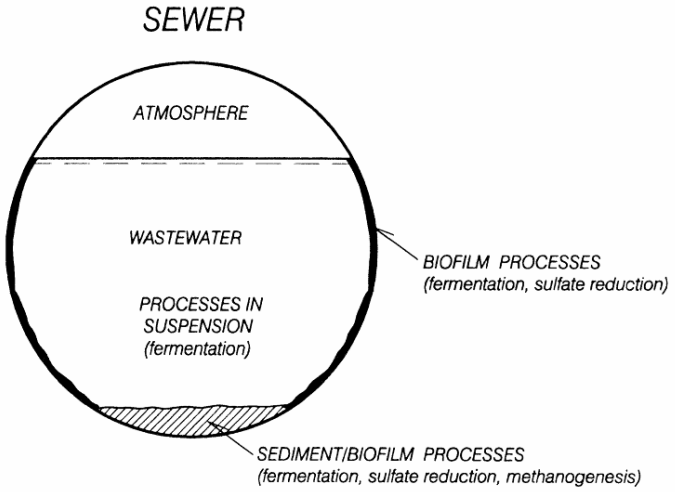
3.2.4 Betingelser for biovækst og –omsætning i kloakken

Kloakrør kan betragtes dels som et biofilmsystem med omsætning i kloakhuden langs rørvæggene og dels som et system med fritsvævende bakterier i vandfasen.

Som det fremgår af figuren nedenfor, så sker processerne i kloakken i, ref. /4/:

- Den suspenderede vandfase
- Biofilmen (kloakhuden)
- Sedimenter
- Kloakkens luftfase
- Kloakvæggene (adsorption, adhæsion, erosion, kemisk nedbrydning mv.)

Der sker en udveksling af stoffer mellem disse faser i kloakken. F.eks. frigives producerede gasser fra vandfasen til luftfasen, men tilsvarende kan der ske en transport f.eks. af ilt fra luftfasen til vandfasen.



Figur 3-1 Skitse af delsystemer og forekomst af mikrobiologiske processer i en gravitationsledning under anaerobe forhold (gengivet fra ref. /4/).

Biofilmen er slimen, der dannes på indersiden af kloakrør, og som i høj grad består af mikroorganismer. Biofilmen er ofte et par millimeter tyk i gravitationskloakker, og meget

tyndere i trykledninger, idet der sker en afrivning af biofilmen ved høje vandhastigheder. Dog kan afvigende hydrauliske forhold skabe gode vækstbetingelser, så biofilmen kan blive meget tyk.

Fritsvævende bakterier får større betydning i store rør (dvs. ved større rørdiameter). Hovedparten af omsætningen af det opløste organiske materiale sker i vandfasen, ikke i biofilmen, ref. /1/.

Biomassen har brug for substrat for at vokse, spildevandets organiske stof er velegnet til det, dog er substratet ofte alligevel den vækstbegrænsende faktor. Dette skyldes, at bakterierne kun kan udnytte meget små og simpelt opbyggede molekyler (se beskrivelsen i afsnit 3.2.3 ovenfor). Det gælder f.eks. organiske stoffer som eddikesyre og glukose dvs. typisk opløst stof. For bakteriernes vækst er det typisk følgende parametre, der har betydning: temperatur, iltkoncentration (eller iltningstrin), pH, næringssaltenes koncentration eller anden inhibering.

Fermentering af det organiske stof kan forekomme i de tre store mikrobiologiske delsystemer i kloakken, dvs. i vandfasen, biofilmen og sedimenterne. Sulfatreducerende bakterier er langsomt voksende og er derfor primært tilstede i biofilmen og i sedimenterne, hvor sulfat fra spildevandet kan trænge ind, ref. /4/.

Der er kun gennemført få studier af kemiske og biologiske processer i kloaksedimenter. Det vides, at der kan være en anseelig anaerob omsætning i bundsedimentet og generelt observeres relativt meget højere anaerob aktivitet hvad angår svovlbrintedannelse end, hvad der observeres i kloakbiofilm. Svovlbrintedannelsen sker i de dybere dele af sedimentet som følge af dannelsen af let bionedbrydeligt organisk materiale ved hydrolyse og fermentering, og af transporten af disse stoffer til de øvre lag af sedimentet.

Metanogenisk mikrobiel aktivitet kræver normalt fravær af sulfat eller i hvert fald en lav sulfatkoncentration. Aktiviteten vil primært finde sted i de dybere dele af sedimenterne og ikke i biofilmen, der typisk er fuldt penetreret af sulfat, ref. /4/.

3.2.4.1 Processernes afhængighed af temperatur og opholdstid

Den typisk observerede temperatur i afløbssystemet (husspildevand) varierer mellem 8 °C om vinteren og op til 20 °C om sommeren, ref. /3/. Ved temperaturer omkring 8-10 °C (f.eks. ved kontakt med grundvandet) er bakterievirksomheden i praksis så lav, at den med den korte opholdstid i kloakken taget i betragtning, er ophørt.

En tommelfingerregel er, at en temperaturforøgelse på 10 °C vil lede til en fordobling i reaktionshastighed. Givet optimale betingelser er denne regel også gældende for bakteriel omsætningshastighed. Som konsekvens heraf er der en signifikant stofomsætning i kloakkerne om sommeren, hvor der i visse kloaksystemer også er en længere opholdstid, og et deraf følgende højere forbrug af ilt.

Udover temperaturen, så har opholdstiden, der afhænger af vejr og stoftilførselsraten, en betydelig indflydelse på hvilke processer, der kan forekomme i kloakken.

Det er kendt, at opholdstiden øges i kloaksystemet som følge af centralisering af renseanlæg, ref. /3/. Ligeledes betyder brugen af tryksatte kloakker en ofte relativt høj opholdstid under anaerobe forhold, specielt i nattetimerne, ref. /4/.

Øget opholdstid, ligesom forekomst af bundsediment, giver øget mulighed for forekomst af biologiske processer og for den grad af omsætning af organisk stof, der kan ske i kloakken.

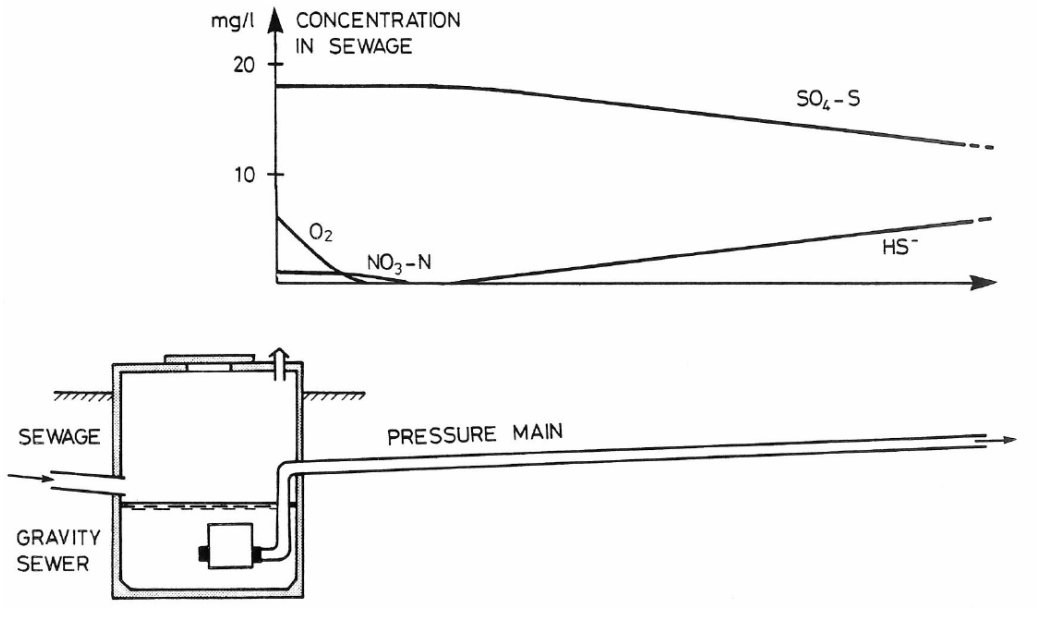
Forekomst af bundsediment afhænger dels af den fysiske sammensætning af spildevandet og dels af de hydrauliske forhold, der er afgørende for, om der kan ske en deposition.

Normalt søges kloaksystemet designet og drevet på en måde der søger at forhindre (eller i hvert fald minimere) forekomst af akkumulering af bundsediment i systemet. I praksis ses dog ofte en (midlertidig) akkumulering og dannelse af bundsediment i kloaksystemer. Specielt i tørvejrsperioder, så kan der forekomme akkumulering af sediment i systemer for afledning af overfladevand, dvs. i separate regnvandssystemer.

I kloaksystemer uden betydelige mængder af sediment, er anaerobe processer domineret af fermentering og sulfat reduktion (svolvbrinteproduktion), og man kan helt se bort fra muligheden for metan produktion, ref. /4/.

3.2.5 Omfanget af svovlbrintedannelse

På figur 3-2, fra ref. /5/, er vist et typisk forløb af koncentrationerne af ilt, nitrat og sulfid igennem en trykledning, hvor først ilt og nitrat forbruges ved aerobe og anoxiske processer, hvorefter sulfat reduceres under anaerobe forhold under dannelse af sulfid.



Figur 3-2 Typiske koncentrationer af ilt, nitrat og sulfid i spildevand hen gennem en trykledning (fra ref. /5 /)

Der er lavet en række tiltag, for med matematiske modeller at kunne estimere produktionsraten af svovlbrinte i kloakker, se f.eks. ref. /4/ og /16/. I ref. /4/ angives, at der for normalt husspildevand kan forventes en produktionsrate for svovlbrinte under anaerobe forhold på et maksimalt niveau omkring 0,25 gS per m^2 per time.

Omregnet til en trykledning med anaerobe forhold over en strækning på 5 km, en rør diameter på ø 0,5 m, og en flowhastighed på 0,5 m/s, fås en svovlbrinte koncentration i vandfasen på ca. 0,6 mg S/l, ved rørets ende. For industrispildevand med højt sulfatindhold, angives i ref. /4/, at svovlbrinteproduktionsraten sagtens kan være op imod ti gange højere for samme rørledning.

Der kan opstå en diffusionsbegrænsning ind i kloakkens biofilm ved lave substratkoncentrationer. Sulfatbegrænsning finder dog først sted, når sulfatkoncentrationen er mindre end 3-5 mg SO_4/l for en typisk biofilmtykkelse på 200-300 µm, ref. /5/.

Denne koncentration er lavere end i normalt husspildevand (i Danmark), der typisk ligger omkring 50 mg/l, men sagtens kan forekomme i meget høje koncentrationer, f.eks. 200 mg SO_4/l eller højere - alene af den årsag, at der kan tillades op til 250 mg SO_4/l i drikkevand, og at den vejledende grænseværdi for udledning af sulfat fra industrier er 500 mg/l.

Den maksimalt opnåelige sulfidkoncentration i spildevandet i kloakker opnås ved en uendelig stor opholdstid af spildevandet under anaerobe forhold, f.eks. i en trykledning eller et uventileret lukket bassin med spildevand og sedimenter, idet spildevandets sulfatindhold i så fald vil være begrænsende for sulfiddannelsen.

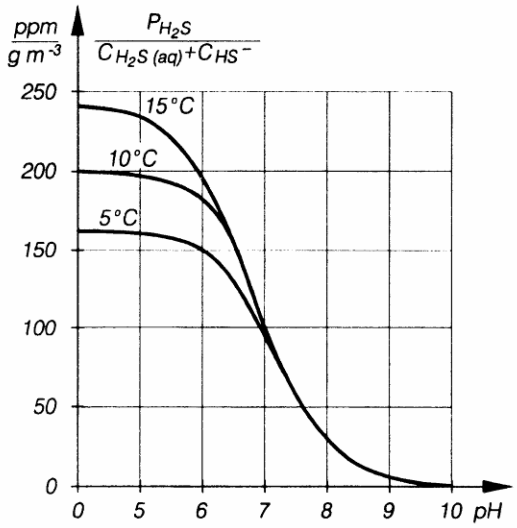
Den mindste antændelige svovlbrintekoncentration, LEL (Lower Explosive Limit), ligger på 4,3 vol. % (jf. tabel 3.5), svarende til 43.000 ppm svovlbrinte.

Af efterfølgende figur 3-3 fra ref. /4/ fremgår, at en svovlbrintekoncentration på 43.000 ppm H_2S i luften over vandfasen vil forudsætte et indhold af sulfidforbindelser i vandfasen på ca. 430 mg (H_2S+HS^-)/l ved ligevægtsbetingelser efter Henry's lov ved en pH-værdi på 7. Et sådant sulfidindhold vil forudsætte et initialindhold af sulfat i spildevandet på ca. 1.250 mg SO_4^{--}/l, hvilket er betydeligt højere end det normale indhold i spildevand på 50 mg SO_4^{--}/l samt 2½ større end den vejledende grænseværdi for udledning af sulfat fra industrier er 500 mg/l.

Hvis der som en rimelig worst case betragtning forudsættes en sulfatkoncentration i spildevandet på 500 mg/l, vil sulfidkoncentrationen i vandfasen således maksimalt kunne blive ca. 165 mg S/l.

Dette svarer til en maksimal svovlbrintekoncentration i luften over vandfasen ved ligevægt med vandfasen på ca. 16.500 ppm H_2S, idet der jf. ref. /4/, og som vist på figur 3-3, vil indstille sig en ligevægt efter Henry's lov svarende til 100 ppm svovlbrinte i luftfasen pr. mg (H_2S+S^{--})/l opløst i vandfasen ved pH 7.

Ligevægtsforholdet påvirkes betydeligt af pH værdien. Dette fremgår af figuren, hvor der for konstant sulfidindhold i vandfasen, omtrent sker en fordobling af partialtrykket af H_2S (ved 10 °C) i luftfasen, hvis pH sænkes fra 7 til 5.



Figur 3-3 Partialtryk af svovlbrinte i ppm (vol.) i atmosfæren per enhed sulfid i vandfasen ved ligevægtsbetingelser (fra ref. /4/).

På baggrund af ovenstående sammenfattes det, at svovlbrintekoncentrationen i et kloaksystem ikke forventes at kunne overskride den antændelige koncentration for svovl-

brinte ved normalt forekommende sulfatindhold i spildevandet. Det vil kun være i meget sjældne og helt særegne tilfælde, at sulfatkoncentrationen overstiger de kritiske ca. 1250 mg SO_4^{--}/l, og da vil der typisk være en specifik kilde, der er årsag til sulfatindholdet i spildevandet. I disse tilfælde må kilden vurderes på linie med øvrig industriel udledning, jf. afsnit 3.1.1.

Det bemærkes, at selvom koncentrationen af svovlbrinte ikke kan overskride den nedre grænse for eksplosionsfare, så er koncentrationerne, der kan forekomme i kloaksystemet, toksiske. Det er således kendt, at koncentrationer helt ned til 10 ppm kan være farlige, selv ved kort tids eksponering.

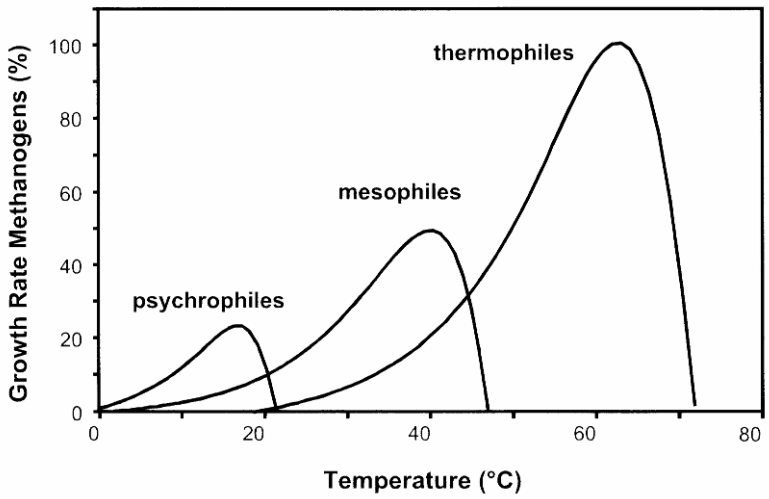
3.2.6 Omfanget af metandannelse

Det vides, at der er tre temperaturintervaller, hvor forskellige metandannende bakteriearter (metanogener) er aktive, jf. tabel 3.2. Figur 3-4 illustrerer forholdet mellem vækst-hastigheder (der praktisk taget korrelerer direkte til omsætningshastighed) i de forskellige temperaturintervaller. I relation til tabellen og figuren, så bemærkes det, at nyere forskning indikerer, at omsætningshastigheden for de psychrofile bakterier område faktisk fortsætter, og har sit optimum, omkring 30-35 °C.

I kloaksystemer er det forventeligt, at det er det psychrofile temperaturområde, der kan forekomme, og at der kun sjældent, og da i kortere tid, forekommer temperaturer i det mesofile område.

Metanogen	Temperatur interval (°C)	Optimal temperatur (°C)
Psychrofile	0 – 20	15
Mesofile	15 – 45	35
Termofile	45 – 75	55

Tabel 3.2 Temperaturintervaller for aktivitet af forskellige metanogener, samt deres optimale temperatur for omsætning af organisk stof, ref. /14/.



Figur 3-4 Relativ væksthastighed for forskellige metanogener, gengivet fra ref. /16/.

Omsætningsprocessens kraftige temperaturafhængighed afspejler sig direkte i den krævede opholdstid for at kunne omsætte en given mængde organisk stof til metan, dvs. ved temperatur omkring 15 °C kræves i størrelsesorden fem gange så lang opholdstid, som ved omkring 60 °C for at omsætte den samme mængde organisk stof til metan.

Der er lavet mange studier af metan produktionsrater i biogasanlæg, der drives i enten det mesofile eller det termofile temperaturinterval. Der er meget lidt publiceret viden om metan produktionsrater i det psychrofile temperaturinterval med spildevand som substrat, ref. /14/.

Den bedste tilgængelige viden er fra gasproducerende lossepladser og studier af udrådning i moser. Herfra vides, at hastigheden hvormed det organiske stof omsættes vil være meget langsom under normale kloaktemperaturer, og en total udrådning af et dybere sedimentlag må forventes at tage flere årtier, ref. /15/.

De potentielle gasmængder, der kan dannes ved total udrådning, er betydelige. I ref. /14/ angives at den teoretiske mulige omsætning af opløst stof er omtrent 1 Nm^3 (normal kubikmenter) metan per kg fedt, 0,5 Nm^3 metan per kg protein, og 0,4 Nm^3 metan per kg kulhydrat.

Der er normalt betydelige mængder af sulfit og sulfat i spildevandet, hvorfor det ikke kan forventes, at metantrinnet når at indtræde indenfor den normale opholdstid i kloaksystemet, ref. /4/.

Er der tilstrækkelig lang opholdstid og/eller dybe sedimentlag i kloaksystemet, kan sulfat mængden dog reduceres tilstrækkeligt til, at der kan forekomme metanoganese, og dermed risiko for dannelse af metan koncentrationer over det antændelig niveau, LEL (Lower Explosive Limit).

3.2.7 Stofferne i kloakkens luft

Der er ikke gennemført mange publicerede studier omkring sammensætning af kloakkers luft. Det vides dog generelt, at mangel på ventilation af kloakker (f.eks. trykledninger) muliggør akkumulering og senere spredning af brandbare, lugtende og giftige gasser produceret ved anaerobe biologiske processer.

I ref. /4/ gengives resultater fra et studie, hvor den ”typiske” sammensætning af kloakluft under anaerobe betingelser er bestemt. Tabel 3.3 viser resultatet af dette studie, som det er gengivet i ref. /4/.

Det bemærkes umiddelbart, at der er en uventet høj koncentration af specielt hydrocarboner og klorede hydrocarboner, hvilket formentligt hænger sammen med at 1) der skelnes ikke mellem stoffer der er tilført kloakken, eller stoffer der er dannet i kloakken, og 2) studiet er foretaget omkring 1972 i Australien, hvor der formentligt er andre mildere udledningskrav til offentlige kloaksystemer fra industrivirksomheder mv.

Gruppe nr og stoffer		**Koncentrationsintervaller ordnet efter størrelse**
(1)	Kuldioxid, CO_2	0,2 – 1,2 %
(2)	Hydrocarboner og klorede hydrocarboner	
	a. Hydrocarboner, hovedsageligt alifatiske forbindelser C_6-C_{14} og mest C_8-C_{12} (benzin)	Op til 500 ppm
	b. Klorede hydrocarboner, mest trichlorethylene med ethylene dichloride og noget carbon tetrachloride	10-100 ppm
(3)	Svovlbrinte, H_2S	0,2 – 10 ppm
(4)	Lugtende gasser og dampe	
	a. Sulfider (mest methyl mercaptan og dimethyl sulfide; noget ethyl mercaptan)	10 – 50 ppb
	b. Aminer (mest trimethylamine og dimethylamine; noget diethylamine)	10 – 50 ppb
	c. Aldehyder (mest butyraldehyde)	10-100 ppb

Tabel 3.3 ”Typisk” sammensætning af kloakluft under anaerobe betingelser, gengivet fra fremstilling i ref. /4/. Der skelnes i kilden ikke mellem stoffer, der er tilført kloakken, eller stoffer der er dannet i kloakken.

De fleste brandbare gasser kræver koncentrationer på mindst nogle volumenprocent (se f.eks. ref. /11/) for at kunne brande i blanding med atmosfærisk luft (1 %-vol. = 10^4 ppm (vol.) = 10^7 ppb (vol.)).

Der er således ingen af de brandbare gasser nævnt i tabellen, der forefindes i en antændelig koncentration i den angivne "typiske" sammensætning.

Stofkoncentrationen givet i tabellen for de lette hydrocarboner ligger nærmest - med koncentrationer 20 gange under det antændelige niveau, og som nævnt ovenfor, så skyldes dette høje koncentrationsniveau for disse formentligt, at der er industrielle kilder, som udleder farlige stoffer til kloakken i koncentrationer, der ikke ville kunne tillades i Danmark.

De lugtende stoffer, der produceres ved de anaerobe biologiske processer, er primært de uorganiske gasser ammoniak og svovlbrinte samt en række forskellige flygtige organiske forbindelser (på engelsk: volatile organic compunds, VOC's).

Eksempler på sådanne VOCs, og deres flammepunkter, er givet i tabel 3.4

Stofgruppe	Eksempler på stoffer	Flammepunkt (°C)
Flygtige svovlholdige stoffer (på engelsk: Volatile sulfur compounds, VSCs)	Methyl mercaptan Ethyl mercaptan Allyl mercaptan Benzyl mercaptan Dimethyl sulfide Dimethyl disulfide Thiocresol	-18 15 18 70 -49 24 64
Nitrogenholdige stoffer	Methylamine Ethylamine Dimethylamine Pyridine Indole Scatole	8 -17 -18 21 121 132
Flygtige fede syrer (på engelsk: Volatile Fatty Acids, VFA)	Eddikesyre Smørsyre Valerianesyre	43 72 86
Aldehyder og ketoner	Formaldehyd (metanal) Ethanal Butanal Acetone Butanon	-53 -39 -7 -20 -9

Tabel 3.4 Eksempler på flygtige organiske forbindelser der forbindes med lugt, og som produceres ved fermenteringsprocesser i spildevand. Stofgrupperne og stofnavnene i tabellen er fra ref. /4/, flammepunktsdata er hentet i en række forskellige kemiske opslagsværker.

De lugtende og brandbare stoffer, der dannes ved mikrobiel aktivitet i spildevandet, kan frigives til luften i kloakken. Herfra kan de spredes videre ud gennem åbninger i kloaksystemet. Som det fremgår af tabel 3.4 er en del brandbare svovl- og nitrogenholdige stoffer, samt aldehyder og ketoner, så flygtige ved normal kloaktemperatur, at de teoretisk kunne antændes, hvis de kan akkumulere til den rette koncentration i kloakkens luftfase.

De lugtende og brandbare stoffer findes dog - med undtagelse af svovlbrinte - oftest kun i meget små koncentrationer i kloakluften, typisk på ppb (parts per billion) niveau

(jf. tabel 3.3), hvilket er på niveau med deres lugtgrænser, ref. /4/, som er meget langt under krævede koncentrationer i luft, for at udgøre en eksplosionsfare.

Svovlbrinte dannes ved anaerobe biologiske processer i selve kloakken ved en samtidig reduktion af sulfat og kan forekomme i væsentlige koncentrationer i kloakkens luft. I ovenstående afsnit 3.2.5, hvor omfanget af svovlbrintedannelsen er beskrevet nærmere, konkluderes dog, at der under de betingelser, som forekommer i kloaksystemer, *ikke* kan opnås svovlbrintekoncentrationer over den laveste antændelige koncentration, LEL (Lower Explosive Limit).

Ifølge ref. /4/ kan metandannelsen i kloakker normalt udelukkes som værende af mindre betydning, hvilket er verificeret i laboratorieforsøg under normale kloakbetingelser. Metandannelsen kan dog være en potentiel mulighed under længerevarende anaerobe forhold især i organiske sedimenter, hvor alt sulfat er omsat til svovlbrinte, som beskrevet ovenfor i kapitel 3.2.6. Metan vurderes således at være den eneste gas, dannet i selve kloaksystemet, som har en potentiel mulighed (om end lille) for at kunne forekomme i kloakluften i antændelige koncentrationer over LEL.

For reference gives tabel 3.5 nogle fysiske egenskaber for udvalgte gasarter, der kan findes i kloakker.

Stof	**LEL (vol-%)**	**Damp densitet (luft = 1)**	**Selvantændelses-temperatur (°C)**	**Molar vægt (g/mol)**
Metan	5	0,61	537	16,04
Svovlbrinte (H_2S)	4,3	1,19	260	34,08
Ammoniak	15	0,59	651	17,03
Methyl mercaptan, d.s.s. metanethiol (CH_4S)	3,9	1,66	420	48,11

Tabel 3.5 Fysiske egenskaber af udvalgte gasarter, der kan forekomme i kloakker

3.3 Sammenfatning omkring stoffer og processer i kloaksystemet

Der er overvejende to årsager til at brandbart stof kan forekomme i kloaksystemet: Enten tilføres stoffet gennem kloakkens åbninger, eller også dannes det ved biologiske og kemiske processer i kloaksystemet.

De brandbare stoffer, der potentielt kan tilføres kloakken udefra kan primært henføres til industrielle kilder.

Stoffer i farlige mængder, herunder brandfarlige stoffer, fra industrielle kilder skal ud fra lovgivningsmæssige krav minimeres til ufarlige koncentrationsniveauer (Miljøstyrelsen har udarbejdet en vejledning omkring dette). Dette gælder også steder, hvor der forventeligt kan ske uheld med spild af brandfarlig væske, der kan føres til kloaksystemet f.eks. ved tankstationer.

Specielt nævnes, at perkolat fra lossepladser kan indeholde gas og skal derfor betragtes på lige fod med andre industrielle kilder.

Er udledningen fra industrielle kilder nedbragt til ufarligt niveau, så er det i princippet kun muligt, at der tilføres brandfarlige stoffer til kloakken fra omgivelserne ved uheld, f.eks. større læk på beholder o.l., hvilket i zoneklassificeringsøjemed betragtes som katastrofale udslip, der ikke skal zoneklassificeres for.

Er der sandsynlige industrielle kilder til udledning af brandfarlige stoffer til kloakken, der *ikke* er nedbragt til ufarligt niveau, så skal der tages hensyn til dette ved udarbejdelse af zoneklassificeringen. Specielt vil olie- og benzinudskillere ofte kunne indeholde eksplosiv atmosfære.

Processer i kloakken domineres af biologisk omsætning af organisk stof, der kun er begrænset af anden kemisk aktivitet. De dominerende processer styres af hvilke redoxforhold, der findes i kloakken. Der kan kun udvikles brandfarlige stoffer, hvis der er anaerobe forhold i kloakken.

De typiske brandfarlige stoffer, der kan forekomme i kloakkens luft, som følge af mikrobiel aktivitet under anaerobe forhold, er:

- Flygtige svovlholdige stoffer (mercaptaner o.l.)
- Nitrogenholdige stoffer (bl.a. aminer)
- Flygtige fede syrer (såsom eddikesyre, myresyre o.l.),
- Aldehyder og ketoner
- Ammoniak
- Svovlbrinte
- Metan

Muligheden for dannelse af stofferne i mængder der kan lede til forekomst af eksplosiv atmosfære afhænger primært af parametrene: opholdstid under anaerobe forhold og mulighed for betydelig sedimentdannelse, der kan ligge uforstyrret i længere tid.

Samlet vurderes det, at det kun er metan, der potentielt kan dannes i kritiske mængder, således at der kan forekomme eksplosiv atmosfære i kloakkens luft.

Metan kan dannes i kloakken under anaerobe forhold, når der ikke er betydelige sulfit/sulfat koncentrationer, og da kun i et betydeligt lag af aflejret sediment, der ligger gennem længere tid (uger, måneder til år).

Det vurderes usandsynligt, at der kan dannes metan i signifikante mængder i kloaksystemer uden betydelig sedimentering.

4. Beskrivelse af kloaksystemer

Kloaksystemer består af en række komponenter som rør, bassiner, pumpestationer og bygværker af forskellig karakter, som hver især kan være meget forskelligt sammensat og konstrueret, specielt afhængigt af alderen på systemet.

I det følgende forsøges på overordnet vis skitseret de væsentligste forhold omkring danske kloaksystemers opbygning, med henblik på i den efterfølgende risikoanalyse, at kunne udpege systemer, der kan være kritiske i forhold til forekomst af eksplosiv atmosfære.

I det foregående kapitel 3 er beskrevet de mulige stoffer, der kan tilføres eller dannes i kloakker, og der ræsonneres, at specielt de hydrauliske opholdstider for sedimenter og vandfase samt udluftningsforhold har stor betydning for, om der kan opstå anaerobe forhold, som er en af væsentligste forudsætninger for evt. dannelse af brandfarlige gasser i kloakker.

Derudover er i kapitel 3 konkluderet, at metan er den eneste gas, der dannes i kloaksystemet, som potentielt kan forekomme i antændelige koncentrationer i kloakker.

Derfor er der i den følgende fysiske beskrivelse af kloaksystemer fokus på hydraulisk opholdstid af såvel vandfase som sedimenter samt udluftningsforholdene i kloaksystemet – med henblik på vurdering af tilstedeværelsen af anaerobe forhold og muligheden for metandannelse.

4.1 Generelle forhold ved det kommunale hovedkloaksystem

Der skelnes overordnet mellem to typer af kloaksystemer:

- separatsystem
- fællessystem

I separatkloakerede systemer føres spildevand og overfladevand fra befæstede arealer i separate rørledninger. I de fælleskloakerede systemer føres spildevand og overfladevand i samme rørledning.

Nyere kloaksystemer etableres normalt som separatsystem, medens fællessystemer i dag især findes i de centrale områder i de fleste større byer. En del af de ældre fællessystemer er efterfølgende blevet separeret.

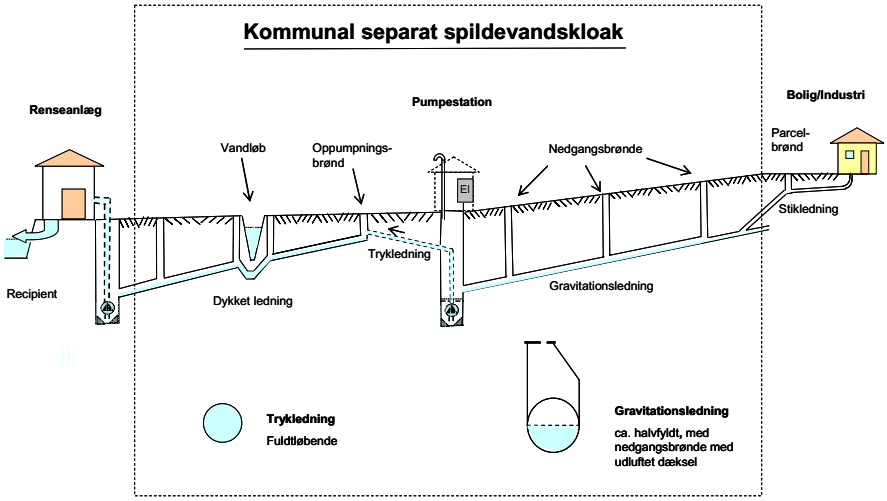
I begge systemer er gravitationskloakker dominerende, men tryksatte kloakker er blevet mere udbredte i takt med centraliseringen af renseanlæggene.

Afløbsvandets opholdstid i kloaksystemet varierer i størrelsesorden fra få timer til et døgn. I fælleskloakerede systemer kan flowraten øges i perioder med vådt vejr med en faktor 100-1000 (ved ekstrem nedbør), sammenholdt med minimums flow situationen, ref. /4/.

I de følgende afsnit beskrives hovedkomponenterne i de forskellige typer kommunale kloaksystemer nærmere. Beskrivelsen omfatter kun det kommunale hovedkloaksystem, som det er defineret i afsnit 1.1.

4.2 Separat spildevandssystem

Eksempel på opbygning af et separat spildevandssystem er skitseret på efterfølgende figur 4-1, idet den stiplede linie symboliserer begrænsningen af de kommunale hovedkloakker fra ejendommenes stikledninger til indløb i kommunalt renseanlæg.



Figur 4-1 Principskitse for et typisk separat spildevandssystem.

Det separate hovedspildevandssystem omfatter i princippet følgende hovedkomponenter:

- Gravitationsledninger med nedgangsbrønde
- Dykkede spildevandsledninger
- Pumpestationer
- Trykledninger med oppumpningsbrønde

4.2.1 Gravitationsledninger

Gravitationsledninger i et separat spildevandssystem har et relativt jævnt flow over døgnet og vil normalt være delvis fyldte og normalt maksimalt halvfyldte. Den mindste dimension af hovedledningerne er ø 200 mm, og ledningerne er sjældent større end ø 500 – ø 600 mm.

Ledningerne lægges normalt med et minimumsfald, som sikrer selvrensning af ledningerne mindst en gang pr. døgn ved vandhastigheder over ca. 0,5-1 m/s afhængig af slæbekraftberegning.

I meget flade områder er ledningerne dog ofte lagt med lavere fald af økonomiske årsager, og i sådanne tilfælde vil der kunne forekomme en sand- og slamaflejring i bunden af ledningerne. Derudover forekommer lunker i en del ældre ledninger, hvor sedimenter vil aflejres. Sådanne ledningsstrækninger skal spules rutinemæssigt, specielt for at mindske risikoen for blokering.

De separate spildevandsledninger er normalt delvist fyldte og er forsynet med nedgangsbrønde med 50 – 100 meters afstand. De fleste nedgangsbrønde er udluftede igennem låsehullerne og mange stikledninger er udluftet over tag på ejendommene. Der vil derfor normalt ikke optræde anaerobe (septiske) forhold i disse ledninger, så længe disse er i normal drift.

Bortset fra evt. aflejret bundsediment, vil den hydrauliske opholdstid være relativ kort i disse ledninger.

4.2.2 Dykkede spildevandsledninger

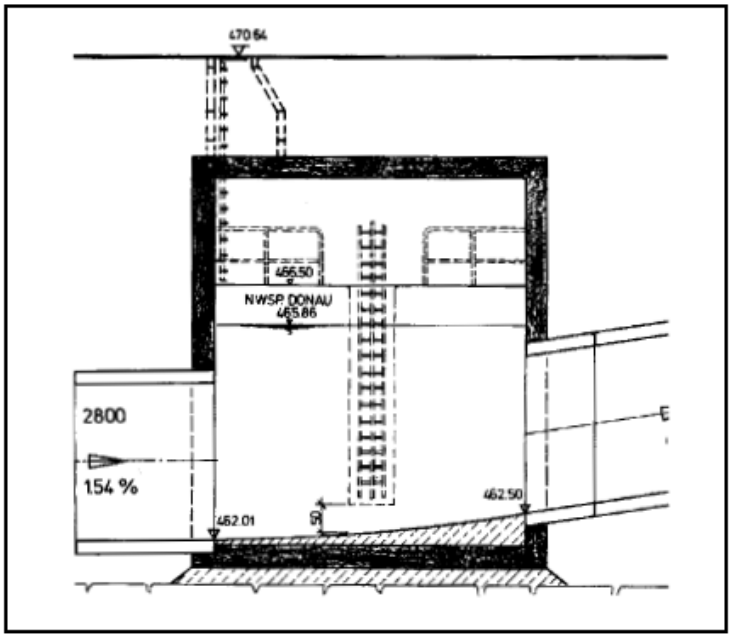
I sjældne tilfælde er der ved passage af et vandløb eller lignende forhindring etableret en spildevandsledning udført som en dykket ledning, som lokalt er vandfyldt med ringe vandhastighed.

I sådanne tilfælde vil der være en risiko for sand- og slamaflejringer i den dykkede del af ledningen, og da ledningen er vandfyldt, vil der teoretisk kunne opstå anaerobe forhold i det aflejrede sediment, som samtidig vil have en lang hydraulisk opholdstid.

Der etableres normalt et bygværk eller en brønd før og efter en dykket ledning for at kunne rense denne. Hvis disse brønde ikke er effektivt udluftede, er der en mulighed for, at der i toppen af disse kan opsamles gasser (H_2S, metan, CO_2, etc.) dannet ved anaerob nedbrydning af de aflejrede sedimenter i den dykkede ledning.

Som et eksempel på denne risiko refereres her en hændelse ved en større dykket ledning under Donau, hvor der forekom en eksplosion i et sådant bygværk, som ikke var udluftet. Kilde: ref. /18/.

Ved en besigtigelse af et bygværk på en stor dykket ledning ved Donau – som er vist på figur 4-2 – skete en gaseksplosion, hvor 4 personer blev stærkt forbrændt og en af disse døde tre uger senere.



Figur 4-2 Bygværk på dykket ledning ved Donau

I perioden før besigtigelsen havde kraftig regn skyllet en masse sand, støv og slam fra gadekloakker ned i den dykkede ledning, hvor dette var aflejret på det dybeste sted af ledningen, og havde medført dannelse af betydelige mængder metan under de anaerobe forhold i den fyldte ledning.

Den dannede metangas havde samlet sig over vandspejlet i bygværket, som var forsynet med et tæt dæksel og uden ventilation – for at undgå udtrængning af flodvand.

Før nedstigningen i bygværket var Ex-måleren blevet klargjort til formålet, men blev ikke benyttet til at checke atmosfæren i brønden. Det formodes at en cigaret fra en af de 4 personer antændte den eksplosive atmosfære. Alternativt var antændelseskilden det medbragte blitzkamera, eller en lampe.

4.2.3 Pumpestationer

Pumpestationer på hovedkloaksystemer for separat spildevand etableres enten med dykkede pumper i en pumpesump – som skitseret på figur 4-1 – eller med tørt opstillede pumper placeret i et pumperum ved siden af en separat pumpesump.

Begge typer pumpestationer kan etableres med eller uden en overbygning.

I disse pumpestationer er sumpene udformet med banketter, således at der normalt ikke forekommer væsentlige ophobninger af sedimenter i sumpen. I de fleste pumpestationer er pumperne i drift flere gange i timen, men små pumpestationer med få tilsluttede ejendomme vil dog kun pumpe nogle få gange pr. døgn.

Alle pumpesumpe er udluftede over terræn – enten med naturlig udluftning – eller ved mekanisk udluftning. Der vil således næppe kunne forekomme anaerobe forhold i disse pumpesumpe, bortset fra lokalt i lidt aflejrede sedimenter i døde hjørner.

Separate pumperum og overbygninger er ligeledes ventileret.

4.2.4 Trykledninger og oppumpningsbrønde

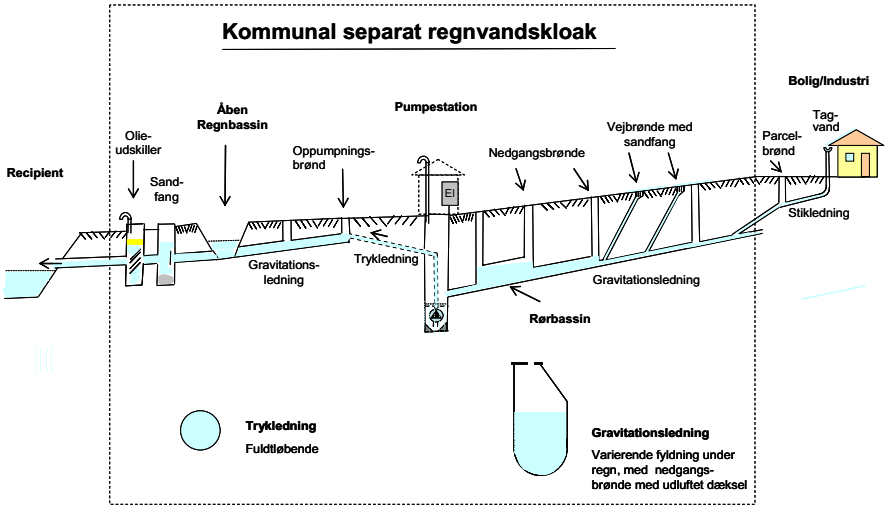
Fra pumpestationerne pumpes spildevandet diskontinuert til en oppumpningsbrønd, hvorfra det løber videre i en gravitationsledning.

Trykledningerne er vandfyldte med en vandhastighed under pumpning på over ca. 0,8 m/s for at undgå aflejringer. Den hydrauliske opholdstid i trykledningerne afhænger af trykledningsvolumenet og døgnflowet, men ligger typisk mellem 1–24 timer.

Ved trykledninger med en hydraulisk opholdstid over ca. 1 time vil der normalt opstå anaerobe forhold i den sidste del af trykledningen, hvilket er kendt at kunne medføre dannelse af visse gasser, herunder især H_2S. Gasmålinger i oppumpningsbrønde viser erfaringsmæssigt varierende og væsentlige mængder svovlbrinte, men *aldrig* metan. Årsagen hertil er vurderet nærmere i kapitel 3.

4.3 Separate regnvandssystemer

Den typiske opbygning af et separat regnvandssystem er skitseret på efterfølgende figur 4-3, idet den stiplede linie symboliserer begrænsningen af de kommunale hovedkloakker fra ejendommenes stikledninger til udløb i recipient.



Figur 4-3 Principskitse for et typisk separat regnvandssystem

Det separate hovedregnvandssystem omfatter følgende hovedkomponenter:

- Gravitationsledninger med nedgangsbrønde og rendestensbrønde
- Pumpestationer og trykledninger
- Regnvandsbassiner
- Olie- og benzinudskillere.
- Udløbsledninger.

4.3.1 Gravitationsledninger med nedgangsbrønde og rendestensbrønde

Regnvandsledningerne i et separatsystem er normalt tomme i tørvejr og har en varierende fyldningsgrad under regn eller snesmeltning.

Regnvandsledningerne modtager kun begrænsede mængder organisk materiale fra veje, pladser og tagarealer, og den hydrauliske opholdstid af vandfasen er normalt meget kort.

Det eneste sted, hvor der aflejres væsentlige mængder sand, jord og slam er i sandfangene i rendestensbrøndene, som er naturligt udluftede.

Der vurderes således ikke at være en potentiel risiko for anaerobe forhold eller dannelse af biogasser i gravitationsledningerne i det separate regnvandssystem.

Den eneste sandsynlige måde, hvor der kan skabes eksplosionsrisiko i de separate regnvandskloakker er i tilfælde af større spild af benzin eller andre brandfarlige væsker på vej- eller pladsarealer.

4.3.2 Pumpestationer, trykledninger og oppumpningsbrønde

Pumpestationer for separat regnvand etableres i enkelte tilfælde, hvor der er meget langt til en recipient.

I princippet udføres disse pumpestationer med udluftning som i pumpestationer for separat spildevand (jf. sektion 4.2.3), men den hydrauliske opholdstid i pumpesumpen varierer meget mere – fra meget kort opholdstid under regn – til meget lang i tørre perioder.

Da der tilføres meget lidt organisk stof til regnvandsledningerne, vurderes risikoen for dannelse af biogasser at være ubetydelig i pumpestationer og trykledninger i det separate regnvandssystem.

4.3.3 Regnvandsbassiner

Forsinkelsesbassiner for regnvand etableres for at reducere de nedstrøms ledningsdimensioner, og etableres enten som åbne bassiner eller som lukkede, udluftede rørbassiner indsat som en del af selve ledningssystemet.

I begge tilfælde vil vandhastigheden under fyldning og tømning være meget lav, hvilket vil medføre en vis sedimentation af sandpartikler. Da der er tale om udluftede forhold og begrænsede mængder organisk materiale vurderes risikoen for etablering af anaerobe forhold dog at være ubetydelig.

4.3.4 Olie- og benzinudskillere og udløbsledninger

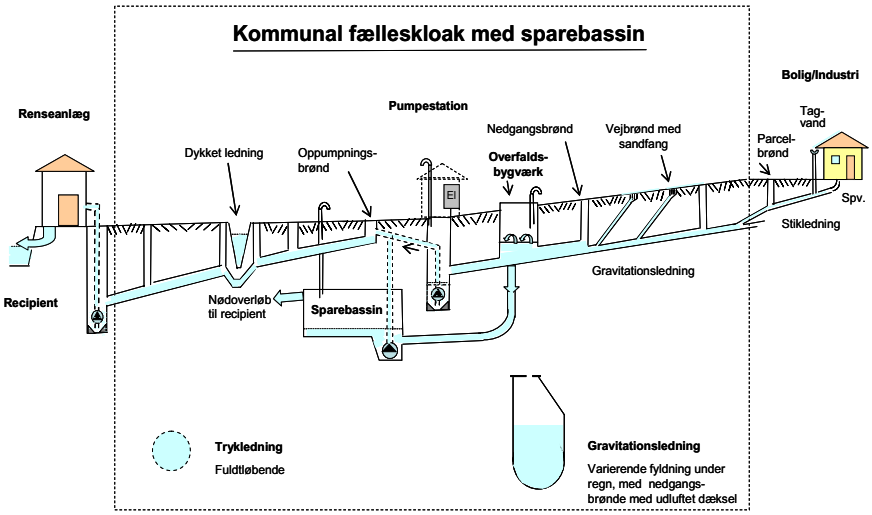
Umiddelbart før større udløb af separat regnvand til recipient etableres ofte en olieudskiller, som er effektiv til at opfange større oliespild ved små regnintensiteter.

En hyppig anvendt udskillertype, som holder på den opsamlede olie ved efterfølgende større regnskyl, er lameludskilleren, som altid bør etableres med et foranstillet sandfang.

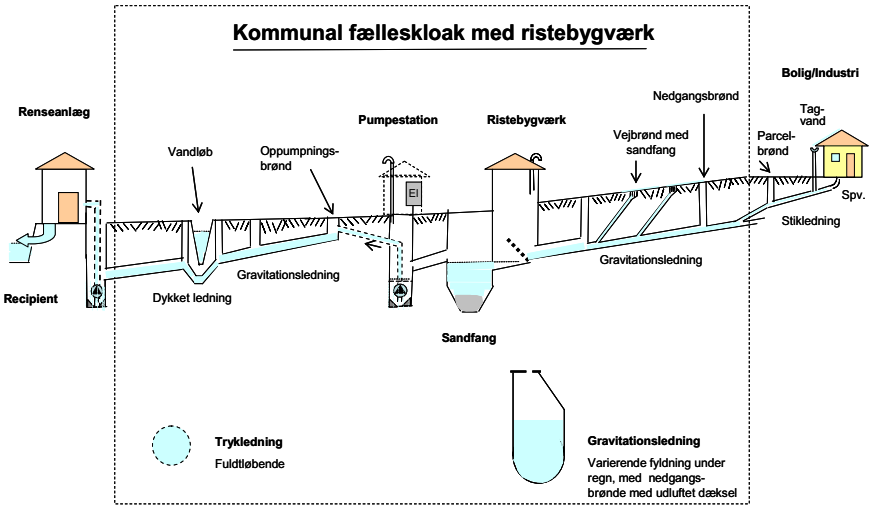
Den tilbageholdte benzin/olie opsamles i toppen af olieudskilleren i et rum, som er udluftet til det fri. Denne type olieudskiller tømmes normalt 1 til 2 gange pr. år eller i tilfælde af større spild. Den opsamlede benzin/olie befinder sig i et udluftet rum, og eventuelle elektroniske niveaumålere er normalt i Ex udførsel.

4.4 Fælleskloaksystem

Eksempler på opbygning af et fælleskloakeret kloaksystem er skitseret på efterfølgende figur 4-4 og figur 4-5, idet den stiplede linie viser begrænsningen af de kommunale hovedkloakker fra ejendommenes stikledninger til indløb i kommunalt renseanlæg eller overløb til recipient.



Figur 4-4 Principskitse for et fælleskloaksystem med lukket sparebassin



Figur 4-5 Principskitse for et fælleskloakssystem med ristebygværk.

Det fælleskloakerede hovedkloaksystem kan omfatte følgende hovedkomponenter:

- Gravitationsledninger med nedgangsbrønde og rendestensbrønde
- Dykkede ledninger
- Pumpestationer
- Trykledninger med oppumpningsbrønde
- Overløbsbygværker, som vist på figur 4-4
- Sparebassiner med nødoverløb, som vist på figur 4-4
    - Lukkede overdækkede bassiner
    - Rørbassiner
    - Åbne bassiner
- Riste- og sandfangsbygværker, som vist på figur 4-5, typisk til renholdelse af dykkerledninger

4.4.1 Gravitationsledninger med nedgangsbrønde og rendestensbrønde

De fælleskloakerede hovedkloakker fører i tørvejr kun spildevand med en meget lille fyldningsgrad – og under regn en blanding af spildevand og regnvand med varierende fyldningsgrad. Dimensionerne af fælleskloakledninger er således generelt meget større end for separate spildevandsledninger, da de er dimensioneret for regnvandsbelastningen.

I tørvejr vil der forekomme en vis sedimentation i bunden af fælleskloakkerne, men denne vil normalt føres videre under efterfølgende større regnhændelser.

Som ved separate spildevandsledninger forekommer der dog også fællesledninger med lunker, hvor sedimenter vil aflejres.

Tendensen til længerevarende oplagring af aflejret sedimenter er dog generelt mindre i fælleskloakledninger end separate spildevandsledninger. Tilsvarende er risikoen for anaerobe forhold mindre i fælleskloakledningerne, da fyldningsgraden er meget lille i tørvejr, og da regnvandet er iltholdigt.

4.4.2 Dykkede fællesledninger

Som ved separate spildevandsledninger er der i sjældne tilfælde – ved passage af et vandløb eller lignende forhindring – etableret en dykket fælleskloakledning, som lokalt er vandfyldt.

Som nævnt under dykkede separate spildevandsledninger er der en teoretisk mulighed for, at der i toppen af rensebrøndene kan opsamles gasser (metan, CO_2, H_2S etc.) dannet ved anaerob nedbrydning af de aflejrede sedimenter i den dykkede ledning, hvis disse brønde ikke er effektivt udluftede.

4.4.3 Pumpestationer, trykledninger og oppumpningsbrønde

Pumpestationer på fællesledninger er i princippet udformet som nævnt i afsnit 4.2.3 for pumpestationer i separate spildevandssystemer, men er ofte etableret med flere pumper p.g.a. det varierende flow.

Ved trykledninger med en hydraulisk opholdstid over ca. 1 time i tørvejr vil der normalt opstå anaerobe forhold i dele af trykledningen, hvilket medfører dannelse af visse gasser, herunder især H_2S. Gasmålinger i oppumpningsbrønde viser erfaringsmæssigt varierende og væsentlige mængder svovlbrinte, men *aldrig* metan. Årsagen hertil er vurderet nærmere i kapitel 3.

Under regn vil der normalt ikke forekomme iltfrie forhold i trykledningen.

4.4.4 Overløbsbygværker

Fælleskloakledningerne er normalt ikke dimensioneret for alle forekommende regnhændelser, men er med passende mellemrum forsynet med overløbsbygværker, hvor den overskydende regn- og spildevandsmængde under kraftig regn aflastes via en overløbskant og en rist – enten direkte til recipient eller til et forsinkelsesbassin (sparebassin) med nødoverløb til recipient, som skitseret på figur 4-4.

I selve overløbsbygværket sker en opsamling af ristegods på risten, som lejlighedsvis spules tilbage i fælleskloakken, enten mekanisk eller manuelt, men derudover er overløbsbygværket normalt selvrensende uden større aflejringer af sedimenter.

I tilfælde, hvor der aflastes direkte til en recipient via en kontraklap, kan aflastningsledningen være delvis dykket med risiko for bundfældning af sedimenter, som ved manglende ventilation af bygværket teoretisk kan skabe anaerobe forhold i bygværket.

I de fleste tilfælde aflastes dog til et forsinkelsesbassin, som har et separat nødoverløb til recipient, og i visse tilfælde er overfaldsbygværket en integreret del af bassinet.

Eksempler på bassintyper beskrives efterfølgende.

4.4.5 Sparebassiner på fællesledninger.

4.4.5.1 Nye overdækkede bassiner

Nye forsinkelsesbassiner i fælleskloaksystemer udformes i dag som lukkede overdækkede bassiner, i princippet efter retningslinierne, som er foreslået i ref. /19/.
I visse tilfælde udformes bassinerne som rørbassiner, som i princippet blot er et langt overdækket bassin.

En meget benyttet bassintype svarer til den på figur 4-4 viste, hvor aflastningen sker via en overløbskant med en rist eller si til et lukket bassin, hvorfra det pumpes tilbage til

fælledsledningen, når der igen er plads i fælledsledningen, og pumperne er normalt placeret tørt i et separat pumperum.

Den hydrauliske opholdstid i bassinerne afhænger af den aktuelle regnhændelse, men er typisk ½ - 2 døgn.

Sådanne bassiner er normalt forsynet med en automatisk spulefunktion, som holder bunden af bassinet fri for både vand og sediment efter tømning. Da bassinerne desuden er forsynet med mekanisk ventilation vurderes risikoen for anaerobe forhold i disse bassiner at være ubetydelig – ved normal drift med spuling og ventilation.

4.4.5.2 Ældre lukkede sparebassiner

Der findes i dag en del ældre overdækkede sparebassiner, som ikke er forsynet med automatisk spuling efter regn, men som kræver en jævnlig manuel spuling. I disse bassiner vil der ofte ligge en del sedimenter samt lidt spildevand tilbage efter tømning af bassinet efter regn, men bassinerne er normalt forsynet med naturlig ventilation.

I denne bassintype kan sedimenter opnå en relativ lang opholdstid, og ved svigtende ventilation kan der teoretisk forekomme anaerobe forhold i det lukkede bassinvolumen. Hvis disse perioder er langvarige kan der potentielt dannes metan.

I nogle tilfælde er ældre sparebassiner udformet som rørbassiner uden spulefunktion, hvilket kan gøre det meget vanskeligt at holde bassinet fri for sedimenter. I sådanne bassiner vurderes risikoen for anaerobe forhold at være meget afhængig af ventilationsforholdene.

4.4.5.3 Åbne sparebassiner

Der findes stadig nogle åbne sparebassiner på fællessystemer i Danmark, som dog formentlig vil blive overdækket efterhånden af hygiejniske og æstetiske årsager.

Disse bassiner har den fordel at risikoen for anaerobe forhold er ubetydelig.

4.4.6 Riste- og sandfangsbygværker på fælledsledninger

I nogle tilfælde er der før pumpestationer med lange afskærende pumpetrykledninger til centrale renseanlæg etableret et riste- og sandfangsbygværk på fælledsledningerne, primært for at undgå tilstopningsproblemer i de lange trykledninger.

Eksempler herpå er Pumpestation Tuborg Nord i Gentofte kommune og Strandvængets Pumpestation i Københavns Kommune.

Disse funktioner svarer i princippet til riste og sandfang på et kommunalt Renseanlæg, men er blot placeret ude i oplandet.

Ristene er automatiske riste, som er indkapslede og ventilerede og placeret indendørs i ventilerede rum. Det opsamlede ristegods transporteres og presses i et lukket system til containere og bortkøres.

Sandfanget er åbent og i visse tilfælde udført som et beluftet sand- og fedtfang. Det sedimenterede sand oppumpes og vaskes i et lukket system og bortkøres, og det afskummede fedt bortkøres med slamsuger.

Den bortventilerede luft fra ristebygningen renses normalt i et kulfilter for at reducere lugtgenerne.

Det opsamlede ristegods og fedt har en stort indhold af organisk stof og er således en potentiel kilde til biogasdannelse, men opholdstiden er normalt ikke over en uge i containere, og ventilationen i bygningerne er normalt meget effektive.

4.5 Sammenfattende vurdering af opholdstid, iltningsforhold og sedimentdannelse for kloaksystemets komponenter

Baseret på beskrivelsen af kommunale hovedkloaksystemer i de foregående afsnit i kapitel 4, kan der sammenfattes følgende vedrørende opholdstid, iltningsforhold og sedimentdannelse i kloaksystemernes hovedkomponenter:

- I separate regnvandssystemer er indholdet af organisk stof så lavt, at der normalt ikke vil forekomme anaerobe forhold i disse.

- Gravitationsledninger og nedgangsbrønde er normalt delvis fyldte - med begrænsede bundsedimenter - og er samtidig naturligt udluftede i sådan grad, at der normalt ikke forekommer anaerobe forhold i disse.

- I pumpestationer, riste- og sandfangsbygværker og overløbsbygværker kan der forekomme en vis sedimentation, men normalt er ventilationen så effektiv, at anaerobe forhold ikke vil forekomme.

- I lukkede bassiner i fællessystemet – især ældre bassintyper - kan der periodevis forekomme en væsentlig sedimentation med lang opholdstid, samt en risiko for anaerobe forhold i tilfælde af utilstrækkelig ventilation og manglende skyllefunktion.

- I trykledninger med over ca. 1 times hydraulisk opholdstid, vil der i tørvejr normalt forekomme anaerobe forhold, men ingen videre sedimentdannelse.

- I ”døde” ledninger - eksempelvis udløbsledninger fra overfaldsbygværker og sparebassiner på fællessystemer – kan der i perioder være stillestående vand og bundsedimenter, som kan medføre anaerobe forhold ved dårlige ventilationsforhold.

- Specielt for olieudskillere på det separate regnvandssystem gælder, at evt. opsamlet benzin/olie lokalt vil kunne medføre eksplosive forhold i opsamlingsrummet øverst i olieudskillerne, selv om der ikke er anaerobe forhold.

I de efterfølgende tabeller (tabel 4.2 til tabel 4.4) er sandsynlighederne for længerevarende anaerobe forhold (> 2 uger) og sedimentationsdannelse vurderet for de væsentligste komponenter i de tre forskellige typer kloaksystemer, vha. vurderingsskalaen givet i tabel 4.1.

Indeks	Kvalitativ sandsynlighedsvurdering
O	Ikke muligt
+	Muligt, men ikke forventeligt
++	Muligt og kan forekomme
+++	Muligt og vil forventeligt forekomme
++++	Vil forekomme

Tabel 4.1 Vurderingsskala for muligheden for anaerobe forhold med store hydrauliske opholdstider og betydelig, længerevarende sedimentdannelse i komponenter i kloaksystemer

Fællessystemer	Anaerobe forhold med hydrauliske opholdstider > 2 uger	Betydelig og længerevarende sedimentdannelse
Ledningsnet med brønde	+	+
Pumpestationer	+	+
Trykledninger	+++	o
Ristebygværker	+	+
Oppumpningsbygværker	+	o
Sandfang	O	+++
Nye lukkede bassiner	+	+
Gamle lukkede bassiner	++	++
Åbne bassiner	O	++
Overløbsbygværker	+	+
Dykkede ledninger (m. uventileret bygværk)	+++	+++
Dykkede ledninger (m. ventileret bygværk)	+	+++
”Døde” ledninger	+++	+++

Tabel 4.2 Vurdering af mulighed for anaerobe forhold med store hydrauliske opholdstider og betydelig, længerevarende sedimentdannelse i komponenter i fælleskloakerede systemer.

Separat spildevand	**Anaerobe forhold med hydrauliske opholdstider > 2 uger**	**Betydelig og længerevarende sedimentdannelse**
Ledningsnet med brønde	+	+
Pumpestationer	+	+
Trykledninger	+++	o
Oppumpningsbygværker	+	o
Dykkede ledninger (m. uventileret bygværk)	+++	+++
Dykkede ledninger (m. ventileret bygværk)	+	+++
”Døde” ledninger	+++	+++

Tabel 4.3 Vurdering af mulighed for anaerobe forhold med store hydrauliske opholdstider og betydelig, længerevarende sedimentdannelse i komponenter i separatkloakeret spildevandssystem.

Separat regnvand	**Anaerobe forhold med hydrauliske opholdstider > 2 uger**	**Betydelig og længerevarende sedimentdannelse**
Ledningsnet med brønde	O	+
Pumpestationer	O	+
Trykledninger	O	o
Regnvandsbassiner	O	++
Sandfang	O	+++
Dykkede ledninger	O	+++
Benzin- og olieudskillere	O	o

Tabel 4.4 Vurdering af mulighed for anaerobe forhold med store hydrauliske opholdstider og betydelig, længerevarende sedimentdannelse i komponenter i separatkloakeret regnvandssystem.

5. Erfaringer fra drift af kloaksystemer

For at få et indtryk af de faktiske driftsforhold i kommunale kloaksystemer, hvad angår forekomst af brandfarlige gasser, er der foretaget interviews med driftspersonale fra en række kommuner.

Der er foretaget personlige interviews med 3 hovedstadskommuner: Københavns Kommune, Tårnbv Kommune og Gentofte kommune samt telefonisk interview med Viborg Kommune.

Derudover er indhentet skriftlige besvarelser på udsendte spørgeskemaer fra Holstebro Renseanlæg og Ringkøbing Renseanlæg (som begge driver og administrerer kommunale kloakker) vedrørende kommunernes erfaringer med eksplosionsrisikoen i det kommunale kloaksystem.

Efterfølgende resumeres de væsentligste resultater fra de foretagne interviews og de modtagne skriftlige besvarelser:

5.1 Registreringer på bærbare Ex-målere

Alle kommunerne benytter godkendte håndbårne Ex-målere (dvs. målere af koncentrationen af brændbar gas i luften) i forbindelse med arbejde i kloaksystemet. Disse målere viser endvidere indholdet af H_2S og ilt og giver alarm herfor.

Alarmgrænsen (for gasalarm) er sat til 20 % af den nedre eksplosionsgrænse, LEL (Lower Explosive Limit).

Generelt oplyses, at der så vidt vides aldrig er registreret gasalarmer på disse målere, men at der lejlighedsvis optræder alarmer for H_2S og lav ilt.

I en enkelt kommune kunne man dog huske en gasalarm for ca. 10 år siden, som viste sig at være en fejl på måleren.

Derudover oplyses, at der før 1980 ofte forekom gasalarmer ved kloakarbejde omkring de gamle – nu nedlagte – gasværker i København, men at dette er historie.

Normalt registreres ikke den aktuelle værdi for koncentrationen af eksplosiv gas på de håndbårne målere, da målerdisplayet kun aflæses i forbindelse med alarm, som aldrig er en alarm forårsaget af eksplosiv gas. Enkelte oplyser dog, at der tilfældigt er bemærket koncentrationsværdier af eksplosiv gas, men at disse altid har ligget tæt på 0 % af LEL.

Under et af interviewene blev en håndbåren måler nedsænket i indløbet til en større pumpestation og målte der 1 % af LEL.

5.2 Registreringer på stationære Ex-målere

Hovedparten af de adspurgte kommuner har installeret online Ex-målere i indløbet til renseanlægget, oftest i sumpen til indløbspumpestationen. I to kommuner er derudover installeret online Ex-målere i indløbet til større pumpestationer, ristebygværker og sparebassiner.

Fra nogle af disse målere overføres analoge signaler til centrale SRO systemer og kan her følges på trendkurver.

Erfaringerne fra disse trendkurver viser, at der i visse tilfælde måles et gradvist stigende niveau af koncentrationen af eksplosiv gas, som efter kalibrering af måleren reduceres igen til 0 % af LEL. I et enkelt tilfælde er forekommet sådanne målinger, som har overskredet alarmgrænsen på 20 % af LEL, og som har vist sig at være en fejlvisning.

Under et af interviewene viste en stationær Ex-måler i en fugtig pumpesump 8 % af LEL, medens en nedsænket håndbåren model kun viste 1 % af LEL.

Det oplyses generelt, at der aldrig er forekommet reelle overskridelser af alarmgrænsen på de stationære Ex-målere, men at der kan være driftsproblemer med de målere, som er placeret i et meget fugtigt miljø.

5.3 Forekommer gaseksplosioner i kloaksystemet?

Ved et interview blev fortalt om en eksplosion i overbygningen til en pumpestation for metanholdigt perkolat fra et gasproducerende affaldsdeponi. Uheld af denne type er forventelige, f.eks. ved svigt af ventilation af pumpestationen, og er ikke relateret til det offentlige kloaksystem.

Derudover har ingen af kommunerne haft kendskab til gaseksplosioner i det offentlige kloaksystem – uden for renseanlægget.

5.4 Hvor i kloaksystemet vurderes at være størst risiko for eksplosion?

Alle kommunerne oplyser, at der ikke vurderes at være risiko for gaseksplosion i et normalt fungerende kloaksystem, med mindre der udledes større mængder brandfarlige væsker til kloakken ved uheld.

Nogle kommuner oplyser således, at risikoen vurderes størst i industriområder, hvor der er størst risiko for spild af brandfarlige kemikalier.

Det oplyses endvidere, at der i enkelte tilfælde er registreret lugt af benzin fra kloaksystemet, men at denne i sådanne tilfælde er blevet fjernet fra kloakken af brandvæsenet – uden eksplosion til følge.

Enkelte kommuner vurderer, at der kan være en vis risiko for metanproduktion i ”døde ledninger og bygværker”. Der henvises bl.a. til en hændelse fra 1990, hvor en person skulle stige ned i en delvis vand- og slamfyldt overløbsledning. Dette medførte en alarm for lav ilt på en bærbar måler, da vandspejlet blev brudt ved nedstigningen – formentlig på grund af metanafgivelse fra bundsedimenterne, som havde ligget længe i ledningen.

En kommune oplyser, at der har været tilfælde med gaslugt i kloakkerne – forårsaget af nærliggende utætte gasledninger, men det har aldrig medført gasalarm eller eksplosion.

5.5 Forslag til at reducere eksplosionsrisikoen i de kommunale kloaksystemer

Der er forekommet følgende forslag til forebyggelse af eksplosioner i kloaksystemet.

Et forslag om at placere overbygninger på dykkede pumpestationer ved siden af pumpebrønden i stedet for over på brønden, for at undgå, at der kan trænge eksplosive gasser op i elektriske installationer, herunder eltavler.

Et forslag om at undgå ”døde” ledninger og bygværker med vand og slam – uden flow og ventilation.

5.6 Sammenfatning af driftserfaringer

Sammenfattende er der ifølge de foretagne interviews ikke registreret reelle gasalarmer på hverken bærbare eller stationære Ex-målere i de adspurgte kommuner.

Ud over en eksplosion i en pumpestation – forårsaget af tilledt metanholdigt perkolat – er ingen af de adspurgte kommuner bekendt med gaseksplosioner i det kommunale kloaksystem.

Ud fra disse erfaringer vurderes der ikke at være risiko for gaseksplosion i et normalt fungerende kloaksystem, med mindre der udledes større mængder brandfarlige væsker til kloakken ved uheld.

6. Risikovurdering og zoneklassificering

I dette kapitel foretages en risikovurdering af i hvilke dele af det kommunale hovedkloaksystem, der kan forekomme brandbare stoffer i kritiske mængder, således at et zoneklassificering er påkrævet. Der gives specifik vejledning omkring udledning af brandfarlige stoffer fra industrielle kilder. Yderligere foretages en vurdering af mulige risikoreducerende foranstaltninger, der kan indføres/anvendes for at nedbringe zoneklassificeringen midlertidigt eller permanent. Til sidst i kapitlet foretages en sammenligning med vejledning givet i andre lande.

6.1 Zoneklassificering af kloaksystemets komponenter

Risikovurderingen, der leder frem til zoneklassificeringen, foretages på grundlaget givet i de foregående kapitler 3 og 4:

- Kapitel 3 beskriver de mulige stoffer, der kan tilføres eller dannes i kloakker, og i afsnit 3.3 konkluderes, at 1) der skal normalt ikke zoneklassificeres for brandbare stoffer, der kan tilføres kloakker fra f.eks. industrivirksomheder, med undtagelse af benzin- og olieudskillere, 2) metan er den eneste gas, der dannes i kloaksystemet, som potentielt kan forekomme i antændelige koncentrationer i kloakker.

- Kapitel 4 beskriver komponenterne i det kommunale hovedkloaksystem, og i afsnit 4.5 præsenteres tabeller med sammenfattende vurdering af opholdstid, iltningsforhold og sedimentdannelse for de enkelte dele af kloaksystemet.

Givet normale ventilationsforhold (som beskrevet i kapitel 4) er det med udgangspunkt i vurderingerne i kapitel 4, af sandsynligheden for længerevarende anaerobe forhold (> 2 uger) og sedimentationsdannelse, muligt at lave en specifik vurdering af risikoen for forekomst af metan i kritiske mængder i de enkelte komponenter af kloaksystemet.

Til det formål anvendes vurderingsskalaen givet i den følgende tabel. Her defineres sammenhængen mellem kombinationer af sandsynligheder (som defineret i tabel 4.1 for længerevarende anaerobe forhold (> 2 uger) og sedimentationsdannelse med den forventede frekvens af forekomst af eksplosiv atmosfære (samt sammenhængen til zoneklasserne).

Kombination af sand-synligheder		Frekvensklasse	Fortolkning	Zoneklasse
++++	++++	Hyppigt / Kontinuert	Forekommer hyppigt eller kontinuerligt i lange perioder	Zone 0
+++	+++	Lejlighedsvist	Forekommer lejlighedsvist ved normal drift	Zone 1
+++ ++	++ ++	Sjældent	Forekommer ikke med sandsynlighed ved normal drift, men som, hvis den alligevel forekommer, kun vedvarer i en kort periode	Zone 2
+++ ++ +	+ + +	Meget sjældent	Forventes ikke at forekomme i anlæggets levetid, men er ikke umuligt (f.eks. grundet sjældne uheld)	Uklassificeret
+++ ++ + o	o o o o	Ikke muligt	Kan ikke forekomme (f.eks. en fysisk umulighed)	Uklassificeret

Tabel 6.1 Sammenhæng mellem sandsynligheden for kombinationen af forekomst af længerevarende anaerobe forhold (> 2 uger) og sedimentationsdannelse med den forventede frekvens for forekomst af potentielt eksplosiv atmosfære.

I de følgende tabeller præsenteres risikovurderingen for de enkelte komponenter i kloaksystemet, hvor der er en direkte kontakt med spildevandet (dvs. der er ikke en ventilationsmæssig adskillelse). Med undtagelse af benzin- og olieudskillere, så er vurderingen alene foretaget med hensyn til risikoen for metandannelse. Der hvor der i tabellerne vurderes at være en risiko for forekomst af eksplosiv atmosfære i et omfang, der leder til zoneklassificering, er der givet en overordnet vurdering af omfanget af udbredelsen af den eksplosive atmosfære.

Er der sandsynlige industrielle kilder til udledning af brandfarlige stoffer til kloakken der *ikke* er nedbragt til ufarligt niveau, så skal der tages hensyn til dette ved zoneklassificering, jf. den nærmere vejledning givet i afsnit 6.2 nedenfor. Specielt vil olie- og benzinudskillere ofte kunne indeholde en eksplosiv atmosfære.

Specifikt for pumpestationer forudsætter ”Uklassificeret”, at banketter i pumpesump har tilstrækkelig fald til, at der ikke dannes sediment i denne (se afsnit 4.2.3) og at sumpen er ventilleret. Alternativt, hvis der er en signifikant opbygning af sediment i pumpesumpen, og sumpen er uventileret, så vil der være behov for at zoneklassificere modsvarende gamle lukkede bassiner (zoneklasse 2).

For dykkede ledninger er der forudsat, at der sker en signifikant akkumulering af sediment i den dykkede del af ledningen, jf. afsnit 4.2.2, samt at bygværk i tilknytning til den dykkede ledning ikke er ventileret. Hvis bygværket er ventileret (naturligt eller mekanisk), så bortfalder zoneklassificeringen (dvs. området er uklassificeret). Tilsvarende er gældende for ”døde ledninger”, som for dykkede ledninger, hvis bygværker er ventilerede, så skal der ikke zoneklassificeres i de ventilerede dele af kloaksystemet.

Fællessystemer	**Forekomst af Ex atmosfære**	**Zoneklasse**	**Omfang af Ex atmosfære**
Ledningsnet med brønde	Meget sjældent	Uklassificeret	
Pumpestationer	Meget sjældent	Uklassificeret	
Trykledninger	Ikke muligt	Uklassificeret	
Ristebygværker	Meget sjældent	Uklassificeret	
Oppumpningsbygværker	Ikke muligt	Uklassificeret	
Sandfang	Ikke muligt	Uklassificeret	
Nye lukkede bassiner	Meget sjældent	Uklassificeret	
Gamle lukkede bassiner	Sjældent	2	Bassinets luftfase
Åbne bassiner	Ikke muligt	Uklassificeret	
Overløbsbygværker	Meget sjældent	Uklassificeret	
Dykkede ledninger (m. uventileret bygværk)	Lejlighedsvist	1	Luftfase i bygværk i tilknytning til den dykkede ledning
Dykkede ledninger (m. ventileret bygværk)	Meget sjældent	Uklassificeret	
”Døde” ledninger	Lejlighedsvist	1	Luftfase i den døde ledning, og eventuelt i tilknyttede bygværker

Tabel 6.2 Vurdering af forekomst af potentielt eksplosiv atmosfære i komponenter i fælleskloakerede systemer.

Separat spildevand	Forekomst af Ex atmosfære	Zoneklasse	Omfang
Ledningsnet med brønde	Meget sjældent	Uklassificeret	
Pumpestationer	Meget sjældent	Uklassificeret	
Trykledninger	Ikke muligt	Uklassificeret	
Oppumpningsbygværker	Ikke muligt	Uklassificeret	
Dykkede ledninger (m. uventileret bygværk)	Lejlighedsvist	1	Luftfase i bygværk i tilknytning til den dykkede ledning
Dykkede ledninger (m. ventileret bygværk)	Meget sjældent	Uklassificeret	
”Døde” ledninger	Lejlighedsvist	1	Luftfase i den døde ledning, og eventuelt i tilknyttede bygværker

Tabel 6.3 Vurdering af forekomst af potentielt eksplosiv atmosfære i separatkloakeret spildevandssystem.

Separat regnvand	Forekomst af Ex atmosfære	Zoneklasse	Omfang af Ex atmosfære
Ledningsnet med brønde	Ikke muligt	Uklassificeret	
Pumpestationer	Ikke muligt	Uklassificeret	
Trykledninger	Ikke muligt	Uklassificeret	
Regnvandsbassiner	Ikke muligt	Uklassificeret	
Sandfang	Ikke muligt	Uklassificeret	
Dykkede ledninger	Ikke muligt	Uklassificeret	
Benzin- og olieudskillere (lavt belastede)	Lejlighedsvist	1	Luftfasen i benzin- og olieudskillere
Benzin- og olieudskillere (middel til kraftigt belastede)	Hyppigt / Kontinuert	0	Luftfasen i benzin- og olieudskillere

Tabel 6.4 Vurdering af forekomst af potentielt eksplosiv atmosfære i komponenter i separatkloakeret regnvandssystem.

Samlet er det således kun fire komponenttyper i det kommunale hovedkloaksystem, hvor det vurderes, at der kan forekomme eksplosiv atmosfære i et omfang, der kræver zoneklassificering:

- Gamle lukkede bassiner uden skyllefunktion og med ringe ventilation (fælles systemer)

- Uventilerede brønde omkring dykkede ledninger (i fælles systemer eller separate spildevandssystemer)

- ”Døde” ledninger (i fælles systemer eller separate spildevandssystemer)

- Benzin- og olieudskillere (i separat regnvandssystemer)

Omfanget af den eksplosive atmosfære vurderes i alle tilfælde at være begrænset til luftfasen i den enkelte komponent, og eventuelt til nærliggende bygværker (specielt for dykkede og ”døde” ledninger), hvis disse ikke er ventilerede.

Varigheden af den eksplosive atmosfære i de tre første af disse komponenter er helt afhængig af ventilationsforhold samt den konkrete sedimentopbygning, men det er rimeligt at antage, at der i bygværker knyttede til dykkede og ”døde” ledninger lejlighedsvist vil forekomme eksplosiv atmosfære.

I bassinanlæg kan der for konkrete anlæg foretages en mere nuanceret vurdering ved at vurdere de konkrete ventilationsforhold og sandsynligheden for længerevarende sedimentopbygning i bassinet. Dette gøres ikke i denne analyse, men der planlægges beregningseksempler til inklusion i den kommende DANVA vejledning for ATEX og kloakker.

I benzin- og olieudskillere vil varigheden afhænge af belastningen (regelmæssig eller sjælden tilførsel) samt af vedligeholdelsesgraden. Lavt belastede anlæg, der tømmes ofte, vil kunne klassificeres som Zone 1, mens øvrige anlæg må klassificeres som Zone 0.

I den kommende DANVA vejledning for ATEX og kloakker, vil der blive givet vejledning omkring zoneklassificering omkring komponenter i spildevandssystemet (dvs. for områder der ikke er i direkte ventilationsmæssig kontakt med spildevandet), f.eks. separate rum for eltavler o.l. ved pumpestationer.

6.2 Specielle forhold omkring industrispildevand

Med udgangspunkt i Miljøstyrelsens vejledning omkring tilslutning af industrispildevand til offentlige spildevandsanlæg er det rimeligt at antage, at normen er, at udslip fra en industrivirksomhed af brandfarlige stoffer i større mængder, der kan have betydning for eksplosionsforhold i kloaksystemet, kun forekommer som følge af sjældne uforudsigelige uheld på en af disse virksomheder.

Efterlever virksomhederne principperne i vejledningen, så er det derfor ikke nødvendigt at zoneklassificere i det kommunale kloaksystem i forhold til mulige udslip af brændbare stoffer fra industrielle kilder.

Det er kommunerne (kommunalbestyrelsen), som meddeler tilladelse efter miljøbeskyttelsesloven til tilledning af industrispildevand til det offentlige spildevandsanlæg. Det er ligeledes kommunerne der kan udstede påbud om ændrede vilkår, f.eks. krav om forbedringer og fornyelse af vilkår, der må anses for utilstrækkelige eller uhensigtsmæssige, eller påbyde ændringer ved tilsluttede anlæg. Sådanne påbud kan f.eks. udstedes med begrundelse i ny viden om farlige stoffer og deres mulige indvirkning på spildevandsanlægget, herunder mulig eksplosionsfare.

Det kan således være nødvendigt, for at undgå zoneklassificering af det kommunale kloaksystem, at kræve sikringsforanstaltninger implementeret hos potentielt kritiske virksomheder, så de ikke med deres udledning påfører en risiko med eksplosionsfare i kloaksystemet. Dette kan f.eks. være i form af system til forrensning af spildevandet inden det afledes til kloaksystemet, så mængden af brandfarlige stoffer i udledningen nedbringes til et ufarligt niveau.

I specifikke, isolerede tilfælde kan der forekomme industrielle kilder til udledning af brandfarlige stoffer til kloakken, der *ikke* er nedbragt til ufarligt niveau, som det forudsættes i Miljøstyrelsens vejledning, ref. /10/. I givet fald, så skal der tages specielt hensyn til dette ved zoneklassificering, som det specificeres i det følgende.

Fremgangsmåden for en detaljeret vurdering af eksplosionsfaren fra en industriel udledning følger den givet i bilag 5 til Miljøstyrelsens vejledning, ref. /10/, suppleret med en vurdering af ventilationsforholdene i kloaksystemet, hvor udledningen sker.

Bilag 5 i Miljøstyrelsens vejledning baseres vurderingen på besvarelse af følgende spørgsmål:

- Er stoffet flygtigt?
- Er dampene tungere end atmosfærisk luft, hvilket betyder, at de vil have en tendens til at forblive i kloaksystemet?
- Er stoffet eksplosionsfarligt?
- Hvad er de maksimalt acceptable koncentrationer i spildevandet?

Ved estimering af de maksimalt acceptable koncentrationer i spildevandet regnes der med de værste betingelser, dvs. ligevægt mellem vand- og luftfasen, og ingen ventilation i luftfasen. Derved fås den maksimalt mulige stofkoncentration i luftfasen ud fra en given koncentration i vandfasen.

Er kloaksystemet normalt ventileret, da vil fremgangsmåden beskrevet i Miljøstyrelsens vejledning give et meget konservativt estimat på koncentrationen i kloakkens luftfase.

Grundlaget for beregningen er Henrys lov, der fastlægger, at der er et konstant forhold mellem et stofs damptryk og dets opløselighed i vand. Hvis dette konstante forhold, der varierer med stoftypen, er over 10^{-3} atm m^3 / mol vil stoffet frigøres til luften i væsentlige koncentrationer – hvilket betyder, at stoffet er flygtigt.

Hvorvidt dampene fra en flygtig væske har tendens til at forblive i kloaksystemet vurderes på grundlag af molvægten, der sammenholdes med den omtrentlige molvægt for atmosfærisk luft på 29 g/mol.

Dampenes ekplosionsfarlighed afhænger dels af, om dampene er brandbare og dels af deres koncentration. Den nedre koncentrationsgrænse, hvor brandbare dampe kan eksplodere/brande (på engelsk: Lower Explosion Limit (LEL)), skal sammenholdes med den maksimale koncentration, der kan forekomme i kloakkens luftfase, som beregnet vha. Henrys lov. Er den maksimale koncentrationen under LEL, så er der ingen eksplosionsfare. Omvendt, er den maksimale koncentration over LEL, så er der risiko for eksplosion, hvis kloaksystemet ikke er udluftet.

Miljøstyrelsens vejledning giver i Bilag 5 et beregningseksempel, samt en tabel med data for en række flygtige stoffer, der kan forekomme i industrispildevand.

Fremgangsmåden for zoneklassificering af kloaksystemer for industriel afledning af spildevand med flygtige, brandbare stoffer, der ikke er nedbragt til ufarligt niveau, er som følger:

1. Vurder stofferne spildevandet efter metoden og kriterierne givet i Miljøstyrelsens vejledning, og bestem hvilke stoffer der kan forekomme i kritiske mængder i kloaksystemet.

2. Vurder kloaksystemets evne til at bortventilere de brandbare dampe, og bestem hvilke dele af kloaksystemet hvor dampene kan forventes at forekomme i kritisk mængde. Som basis for vurderingen anvendes oplysninger om ventilationsforhold, samt det forurenede vands opblanding med andre spildevandsstrømme.

Klassificer de dele af kloaksystemet, hvor der forekommer kritiske koncentrationer er brandbare dampe, efter sandsynlighedsvurderingsskalaen givet i tabel 6.1.

6.3 Muligheder for nedklassificering

Det er i langt de fleste tilfælde muligt at nedklassificere zoneklassen for et område, hvis ventilationsforholdene forbedres enten gennem naturlig eller mekanisk ventilation. Det er ligeledes muligt at nedklassificere et område, hvis kilden til dannelse af eksplosiv atmosfære nedbringes eller elimineres.

Sidstnævnte kan ske gennem

- Fysisk udformning af kloaksystemer så der ikke opstår betydelige aflejringer af sediment

- Manuel/automatisk fjernelse af aflejret sediment, f.eks. ved spulning

Naturlig ventilation er dog formentligt den billigste og mest effektive barriere mod forekomst af eksplosiv atmosfære. Ved dybere og længerevarende sedimentdannelse er det oftest ikke muligt helt at undgå anaerobe forhold i sedimentet, men de producerede gasser kan da bortventileres fra luftfasen over vandoverfladen.

Midlertidig, naturlig ventilation (f.eks. åbning af dæksler o.l.) kan anvendes til at bortventilere akkumulerede gasser og derved fjerne en eventuelt eksplosiv atmosfære. Således kan et område i et kloaksystem nedklassificeres så længe at ventilationen opretholdes.

Det er ikke muligt på generel basis at modellere effekten af åbning af dæksler eller lignende pludselig ændring af ventilationsforholdene i kloakken. Dette skyldes, at ventilationsmodeller kræver detaljeret kendskab til forhold som:

- Ventilationens omfang (dvs. kvantificering af luftflowet)
- Størrelse (dimensioner) af det ventilerede volumen
- Ventilationens effektivitet i det givne (ventilerede) volumen (dvs. kvantificering af omfanget af svært ventilerbare dele af gasvolumenet)
- Den initiale koncentration af brandbar gas (worst-case kan dog antages)
- Tilførselsraten af brandbar gas (kan dog antages at være negligeable i de fleste systemer)

Det er dog i princippet muligt at opstille specifikke eksempler, hvorfra man kan udlede generelle betragtninger om hvor mange dæksler, der skal åbnes, og hvor længe de skal være åbne, før der ikke længere findes eksplosiv atmosfære i kloakken.

Det bedste værktøj til vurdering af eksplosionsforhold i kloaksystemet ved en sådan pludselig og midlertidig ventilation er derfor målinger på stedet af koncentrationerne af eksplosiv gas med eksplosiometer.

6.4 Sammenligning med udenlandske vejledninger

I Sverige og Tyskland gives national vejledning om zoneklassificering af visse spildevandstekniske installationer.

I Sverige er der udarbejdet et tillæg til den internationale zoneklassificeringsstandard, se bilag ND i ref. /20/. Tillægget indeholder en række eksempler på zoneklassificering, herunder for et biogasanlæg, som f.eks. kan findes på et renseanlæg, men der gives ingen specifik vejledning for andre spildevandstekniske installationer, som f.eks. komponenterne i kloaksystemet.

I Tyskland er en (generel) national vejledning omkring ATEX og zoneklassificering (jf. ref. /21/), i denne vejledning henvises til en specifik vejledning omkring spildevandstekniske systemer (se ref. /22/).

I den tyske ATEX vejledning omkring spildevandstekniske systemer forudsættes, at normaltilstanden i kloaksystemet er, at der må forventes at der findes brændbare dampe eller gasser, der lejlighedsvist leder til forekomst af potentielt eksplosiv atmosfære. Disse brændbare dampe forudsættes at komme fra:

- Dampe fra brændbar væske (op til 100 liter benzin eller anden brændbar væske)
- Biogas (brændbar gas fra forrådnelse af spildevandet)

Det er tydeligt at basisantagelserne i den tyske vejledning ikke dækker normaltilstanden i danske kloaksystemer. I Danmark er det udgangspunktet, at der ikke forekommer brændbar væske (fra industrielle udledninger eller lignende) i kloaksystemet. Endvidere, så er det gennem analysen i denne rapport bekræftet, at det kun er under helt specielle forhold, at der kan dannes betydelige mængder af biogas (i.e. methan) i danske kloaksystemer (jf. kapitel 3 og 4).

I nedenstående tabel 6.5 er der givet zoneklassificeringskrav for komponenter i fællessystemer fra den tyske vejledning, samt de tilsvarende krav, der er udledt specifikt for danske forhold.

Forskellen i de grundlæggende antagelser om normaltilstanden i kloaksystemer i Tyskland og Danmark viser sig i den resulterende zoneklassificering. For de kritiske komponenter i de danske systemer er der dog en rimelig overensstemmelse med den tyske vejledning, der dog har en tendens til at overvurdere risikoen.

For de naturligt ventilerede/udluftede komponenter i spildevandssystemet (såsom pumpestationer, overløbsbygværker mv.) er der ikke under danske forhold fundet et behov for zoneklassificering. I den tyske vejledning er der krav om zoneklassificering, medmindre at der er et pålideligt system med mekanisk ventilation og automatisk start af nødventilation (dvs. ekstra ventilation), hvis der detekteres gas i bygværket.

Samlet set, så vurderes zoneklassificering efter den tyske vejledning generelt at overvurdere risikoen for, at der opstår potentielt eksplosiv atmosfære, hvis den anvendes på komponenter i det danske kloaksystem.

Fællessystemer	**Zoneklasse efter tysk vejledning**	**Zoneklasse udledt for danske forhold**
Ledningsnet med brønde	2^{1} / Uklassificeret[2]	Uklassificeret[1]
Trykledninger	1^{0}	Uklassificeret[1]
Pumpestationer, Ristebygværker, Oppumpningsbygværker, Sandfang, Nye lukkede bassiner, Overløbsbygværker	1^{1} / 2^{2} / Uklassificeret[3]	Uklassificeret[1,2]
Gamle lukkede bassiner[4]	1^{1} / 2^{2} / Uklassificeret[3]	2^{0}
Åbne bassiner	Uklassificeret[1]	Uklassificeret[1]
Dykkede ledninger (m. uventileret bygværk)	1^{0}	1^{0}
Dykkede ledninger (m. ventileret bygværk)	2^{1} / Uklassificeret[2]	Uklassificeret[1,2]
”Døde” ledninger	1^{0}	1^{0}

Tabel 6.5 Sammenligning af zoneklassificering efter tysk vejledning og efter specifik vurdering af danske forhold.

Noter:
0: Uventileret.
1: Naturlig ventilation.
2: Mekanisk ventilation.
3: Mekanisk ventilation og start af nødventilation (dvs. ekstra ventilation) ved gasalarm.
4: Den tyske vejledning tager ikke eksplicit hensyn til, at der findes ældre dårligt ventilerede bassiner, da der jo er krav om at alle bassiner er ventilerede (ligesom der er i Danmark for nye bassiner).

7. Referencer

/1/ Kamma Raunkjær, Characterization and transformation of wastewater organic matter in sewer systems, ph.d. afhandling, Ålborg Universitet, 1993.

/2/ Septiktanke, MST rapport nr. 16.

/3/ Ændringer i spildevands sammensætning i afløbsnettet, eksamensprojekt.

/4/ Thorkild Hvitved-Jacobsen, Sewer Processes – Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks, CRC Press, 2001.

/5/ Per Halkjær Nielsen, Svovbrintedannelse i biofilm fra spildevandsledninger, licentiatafhandling ved Laboratoriet for Miljøteknik, Aalborg Universistetscenter, december 1987.

/6/ Anaerobic Treatment – A Grown-up Technology, Conference Papers, Aquatech '86 Water Treatment Conference, Amsterdam, The Netherlands, 15.-19. September, 1986.

/7/ Regn og spildevand i byer – På vej mod fremtidens afløbssystemer, ATV, September 2004.

/8/ Jes Vollertsen, Asbjørn Haaning Nielsen, Henriette Stokbro Jensen, Thorkild Hvitved-Jacobsen, "Modeling The Formation And Fate Of Odorous Substances In Collection Systems", Section of Environmental Engineering, Aalborg University, Sohngaardsholmsvej 57, 9000 Aalborg, Denmark.

/9/ E M Gregson, Review of Landfill Gas: Incidents and Guidance, UK HSE, Oct. 2003.

/10/ Tilslutning af industrispildevand til offentlige spildevandsanlæg, Vejledning nr. 2, Miljøstyrelsen, Miljøministeriet, 2006.

/11/ Crowl and Louvar, Chemical Process Safety, 2. udgave, Prentice Hall, 2001.

/12/ EN 60079-10, Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 10: Classification of hazardous areas, 2002

/13/ EN 61241-10, Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust – Part 10: Classification of areas where combustible dust are or may be present, 2004

/14/ Åsa Davidsson, Increase of biogas production at wastewater treatment plants – Addidition of urban organic waste and pre-treatment of sludge, Ph.D. dissertation, Water and Environmental Engineering, Department of Chemical Engineering, Lund University, Sweden, 2007.

/15/ Metode til risikovurdering af gasproducerende lossepladser, Miljøprojekt Nr. 648, Miljøstyrelsen, Miljø- og Energiministeriet, 2001.

/16/ Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1), IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes, Scientific and Technical Report No. 13, IWA Publishing, 2002.

/17/ Ori Lahav, Yue Lu, Uri Shavit, Richard E Loewenthal, “Modelling Hydrogen Sulfide Emission Rates in Gravity Sewage Collection Systems”, Journal of Environmental Engineering, November 2004.

/18/ Dipl.-Ing. V. Wilhelm, Stuttgart, “Gefährdungen durch Gase bei Arbeiten in Kanalisationsanlagen – Theorie oder tödliche Realität?”, TIEFBAU 9/1997.

/19/ Spildvandsforskning nr. 24 fra MST

/20/ SEK HB 426: Klassning av explosionsfarliga områden - Områden med explosiv gasatmosfär, september 2004.

/21/ BGR 104, Explosionsschutz-Regeln, Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung, März 2005.

/22/ GUV-I 8594, Beispielsammlung, Explosionsschutzmaßnahmen bei der Arbeit im Bereich von abwassertechnischen Anlagen, Ausgabe Januar 2005.