



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp
Fakultetet for realfag og teknologi

Bruk av Anammox for nitrogenfjerning på renseanlegg med fokus på hovedstrøm

Use of Anammox for nitrogen removal at
wastewater treatment plants with focus on the
mainstream

Charlotte Marie Trovaag
Vann- og miljøteknikk

Forord

Masteroppgaven markerer slutten på fem, fine og lærerike år på Vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Jeg ønsker å rette en stor takk til Lars John Hem, for hans verdifulle veiledning gjennom hele prosessen. Tusen takk for alle engasjerende og lærerike samtaler vi har hatt om fremtidens avløpsrensing.

Jeg vil også takke Biowater Technology for muligheten til å låne reaktoren til pilotforsøket. Videre vil jeg rette en stor takk til fagmiljøet ved NMBU, spesielt Lena Oksdøl Foseid og Fløy-5-laben. Jeg ønsker også å rette en stor takk til gjestfriheten som ble vist på Bekkelaget rensesanlegg av Hilde Tsui og på Dokhaven WWTP i Rotterdam av Stefan Geilvoit, og tilsendt data fra Nordre Follo rensesanlegg. Til slutt vil jeg rette en stor takk til mine kjære foreldre og gode venner som har stilt opp gjennom hele prosessen. Jeg er utrolig takknemlig for de fantastiske årene på NMBU, og kommer til å savne det gode faglige og sosiale miljøet.

Helt siden jeg var liten har jeg alltid vært opptatt av og tilbragt mange timer ved og i Oslofjorden. Derfor har det vært givende å lære mer om dagens tilstand i Oslofjorden og hvordan vi kan bygge ut bærekraftige rensesanlegg som reduserer nitrogentilførselen for å ta vare på livet i havet.

Vannbransjen står ovenfor en spennende tid og jeg gleder meg til å gjøre mitt bidrag for å sikre rent vann. Prosessen med masteroppgaven har vært ekstremt lærerik og jeg sitter igjen med mange erfaringer som jeg kommer til å bruke videre i arbeidslivet. Jeg håper at masteroppgaven kan være til inspirasjon for videre forskning og at flere velger en jobb med vann!



Charlotte Marie Trovaag

Ås, mai 2023

Sammendrag

Masteroppgaven er en del av et tverrfaglig masterprosjekt ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), hvor masterstudenter fra ulike fakulteter har sett på tverrfaglige sammenhenger og årsaker til hvorfor tilstanden i Oslofjorden er kritisk. Motivasjonen bak oppgaven er å lære mer om bærekraftig nitrogenfjerning, med et fokus på renseprosessen Anammox. Den biologiske renseprosessen Anammox er en relativt ny rensemetode som det forskes på over hele verden. Det er forventet en oppdatering av dagens avløpsdirektiv fra 2007, med strengere rensekraav for nitrogenfjerning og energinøytralitet. Ved å benytte Anammox er det forventet lavere oksygenforbruk, reduserte driftskostnader og ikke et behov for en ekstern karbonkilde.

I masteroppgaven har det blitt gjennomført et pilotforsøk med bruk av biomasse fra DeAmmon fra Bekkelaget renseanlegg. Pilotforsøket som har blitt gjennomført tyder på at nitrogen har blitt fjernet i prosessen, men på grunn av begrensende faktorer i forsøksoppsettet, vil ikke resultatene gi nok grunnlag for å si om prosessen er egnet på hovedstrømmen. Et annet interessant funn fra resultatene er at det kan se ut som om nitrat har blitt fjernet, uten at det har blitt tilsatt en karbonkilde. Ved design av Anammox på hovedstrømmen, kan det være fordelaktig med tilhørende Anammox-prosess på rejevtvannet eller se på et kombinasjonssystem for rejevtvannet og hovedstrømmen. Det forutsettes god forbehandling før Anammox.

Det bør gjennomføres mer forskning for å si noe om hvor vidt renseprosessen Anammox kan være en egnet løsning alene på hovedstrømmen, blant annet med fokus på drift ved lave temperaturer. Litteraturen, pilotforsøket og designet som er foreslått legger til grunn for at hvis det er mulig å få til, vil det være et effektivt og bærekraftig bidrag for å fjerne nitrogen fra renseanleggene til Oslofjorden. Å implementere Anammox-prosessen på rejevtvannet kan være et positivt bidrag for den totale renseeffekten for nitrogen på et renseanlegg, men det bør forskes mer på hvordan man kan gjøre det på hovedstrømmen.

Summary

The master's thesis is part of an interdisciplinary master's project at the Norwegian University of Life Sciences (NMBU), where master students from different faculties have looked at interdisciplinary connections and reasons why the condition of the Oslofjord is critical. The motivation behind the master's thesis is to learn more about sustainable nitrogen removal, with a focus on the Anammox treatment process. The biological wastewater treatment process, the Anammox process, is a relatively new treatment method that is being researched worldwide. An upgrade of the current wastewater directorate from 2007 is expected, with stricter requirements related to, among other things, nitrogen treatment efficiency and energy neutrality. By using Anammox, lower oxygen consumption, reduced operating costs and no need for an external carbon source are expected results.

In the master's thesis, a pilot experiment has been carried out using biomass from DeAmmon at the Bekkelaget treatment plant in Norway. Based on the pilot trial results, the feasibility of implementing the Anammox process on the mainstream on its own remains uncertain. The results suggest that nitrogen has been removed from the process. Another interesting finding from the results is that it appears that nitrate has been removed without a carbon source being added.

There are several factors surrounding the Anammox process that should be further researched, including focusing on operation at low temperatures. The literature, pilot experiment and design proposed assume that if this is possible, it will make an effective contribution in removing nitrogen from the treatment plants to the Oslofjord in a sustainable way. When designing the Anammox process, a prerequisite is necessary to ensure sufficient pre-treatment. Implementing the process on the rejectwater, may make a positive contribution to the total nitrogen purification effect at a wastewater treatment plant. However, it is recommended to carry out further research on the implementation of Anammox for nitrogen removal in the mainstream of wastewater treatment plants.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Summary	v
Innhold	vii
Figurer	xii
Forkortelser	xiii
1 Introduksjon	1
1.1 Motivasjon	1
1.2 Nitrogentilførsel til Oslofjorden	2
1.3 Problemstilling	3
1.4 Begrensninger	4
1.5 Struktur på oppgaven	4
2 Teori og bakgrunnsinformasjon	7
2.1 Bakgrunn for tematikk	7
2.1.1 Vanddirektivet og forurensningsforskriften	7
2.1.2 Forslag til et oppdatert avløpsdirektiv	8
2.1.3 Oslofjorden som resipient	8
2.1.4 Nitrogentilførsel til Oslofjorden	10
2.1.5 Nitrogenkretsløpet	11
2.1.6 Biokjemiske prosesser for nitrogenfjerning	12
2.1.7 Teknisk gjennomgang av Anammox-prosessen	14
2.1.8 Veksthastigheten til biologiske renseprosesser	16
2.2 Nitrogenfjerning i Norge	16
2.2.1 Avløpsrensing	17
2.3 Utbygging av fremtidens renseanlegg for nitrogenfjerning	20
2.4 Oppsummering av kapittel	22
3 Metode	23
3.1 Del 1: Litteraturstudie	25

3.1.1	Metode	25
3.1.2	Vurdering av metoden	25
3.2	Del 2: Befaringer	26
3.3	Del 3: Pilotforsøk	27
3.3.1	Forsøksoppsett	27
3.3.2	Metode	28
3.3.3	Fremstilling og analyse av data	29
3.3.4	Vurdering av metode	30
3.4	Del 4: Forslag til design og anlegg	30
4	Resultat: Erfaringer med Anammox-prosessen	31
4.1	Rejektvannsrensing med Anammox-prosessen	33
4.1.1	Erfaringer fra Norge	34
4.1.2	Slujesjesjik slambehandlingsanlegg i Rotterdam (Nederland)	36
4.2	Bruk av Anammox-prosessen på hovedstrøm	37
4.2.1	Internasjonale erfaringer	37
4.2.2	Anammox-prosessen sammenlignet med nitrifikasjon/ denitrifikasjon	42
4.2.3	Erfaringer fra Beliga (Gent University)	42
4.2.4	Oppstart av reaktorer med Anammox-prosessen	42
4.3	Erfaring med Anammox fra akvakultur	43
4.4	Oppsummering av kapittel	43
5	Resultat: Pilotforsøk	45
5.1	Resultater fra pilotforsøk	46
5.2	Feilkilder	52
5.2.1	Forsøksoppsett	52
5.2.2	Analysene	53
5.3	Oppsummering av kapittel	53
6	Resultat: Forslag til design av Anammox på hovedstrømmen	55
6.1	Eksisterende løsning	55
6.2	Forslag 1 - Design av Anammox	56
6.3	Forslag 2 - Design av Anammox	58
6.4	Løsning for økte mengder med fremmedvann	59
6.5	Oppsummering av kapittel	59
7	Vurderinger	61
7.1	Hvilke erfaringer ligger til grunn for implementering av Anammox-prosessen på fortynnet og kaldt avløpsvann?	62

7.2	Hvordan kan pilotforsøk bidra med å bekrefte om Anammox-prosessen kan være en effektiv metode for å fjerne nitrogen i kaldt og fortynnet avløpsvann?	63
7.2.1	Resultater	63
7.2.2	Forslag til videre testing med pilotforsøk	63
7.2.3	Forslag til et forsøksoppsett ved videre testing	65
7.3	Hvilke forutsetninger er viktig for å oppnå effektiv fjerning av nitrogen ved bruk av Anammox-prosessen på hovedstrømmen?	66
7.4	Anammox som et bidrag for å redusere nitrogen til Oslofjorden	67
7.5	Forslag til videre arbeid	71
8	Konklusjon	73
	Referanser	75
	Vedlegg A Data fra Pilotforsøk	79
	Vedlegg B Analysemetodene	83

Figurer

1.1	Oslofjorden	1
1.2	Struktur på oppgaven	5
2.1	Befolkningsvekst	9
2.2	Nitrogentilførsel til Oslofjorden	10
2.3	Nitrogenkretsløp	11
2.4	Kjemiske symboler	12
2.5	Nitrogenfjerningsprosess med etter-denitrifikasjon	12
2.6	Prosessbeskrivelse av Anammox	14
2.7	Teknisk gjennomgang av Anammox	15
2.8	Renseanlegg rundt Oslofjorden	17
2.9	Oppbygging av et renseanlegg	18
2.10	Tre ulike prosessforslag for biologiske renseprosesser	19
2.11	Fokusområder for fremtidens renseanlegg	20
2.12	Bærekraftsmålene som er relevant for oppgaven	21
3.1	Metode	23
3.2	Oppbygging av oppgaven	24
3.3	Oversikt over litteratursøk	25
3.4	Forsøksoppsett av pilotforsøk	27
3.5	Illustrasjon av et batch-forsøk	28
3.6	Fremgangsmåte for analysene og prøveuttak	29
4.1	Erfaringer med Anammox	31
4.2	Erfaringer med Anammox presentert i en tidslinje	32
4.3	Rejektvannsrensing	33
4.4	Bekkelaget renseanlegg	34
4.5	Data fra AnitaMox på Nordre Follo renseanlegg	35
4.6	Anammox-reaktor på Slujesjesjik slambehandlingsanlegg i Rotterdam	36
4.7	Sammenligning mellom studiene gjennomført i Rotterdam og i Sverige med bruk av Anammox på hovedstrøm	37

4.8	Tradisjonell nitrifikasjon/denitrifikasjon sammenlignet med Anammox . . .	38
4.9	Forsøksdesign gjennomført ved Dokhaven WWTP i Rotterdam	39
4.10	Renseresultater fra CENIRELTA	40
4.11	Renseresultater for fjerning av mikroforurensninger i CENIRELTA	41
4.12	Sammengning av Anammox med nitrifikasjon/denitrifikasjon	42
4.13	Forslag fra en studie i Kina	43
5.1	Forenklet illustrasjon av et biomedie	45
5.2	Bilder av biomediet som ble benyttet	46
5.3	Pilotforsøk: pH og temperatur	46
5.4	Pilotforsøk: Overordnede resultater	47
5.5	Pilotforsøk: Resultater fra periode 1	48
5.6	Pilotforsøk: Resultater fra periode 2 - Del 1	49
5.7	Pilotforsøk: Resultater fra periode 2 - Del 2	50
5.8	Pilotforsøk: Resultater fra periode 3	50
5.9	Pilotforsøk: Forslag til feilkilder	52
6.1	Forenklet flytskjema over NFRA sin renseprosess	55
6.2	Forslag til et design med Anammox på hovedstrømmen	56
6.3	Forslag til et design med Anammox kombinert med sidestrøm-Anammox	58
6.4	Forslag til en løsning for å håndtere fremmedvann	59
7.1	Oppsummering av forskningsspørsmålene, metodene, erfaringer og forslag til videre arbeid	61
7.2	Videre forskning på Anammox	64
7.3	Forbedret forsøksdesign	65
7.4	Livsløpsanalyse av Anammox	68
7.5	Oversikt med vurdering av Anammox som en bærekraftig rensemetode for nitrogenfjerning.	69
7.6	Forslag til videre arbeid	71

Forkortelser

Anammox	Anaerob ammonium oksidasjon
AOB	Ammoniumoksiderende bakterier
LCA	Livsløpsanalyse
NOB	Nitrittoksiderende bakterier
PE/pe	Personekvivalenter
RA	Renseanlegg

1. Introduksjon

1.1 Motivasjon

Klima- og miljøministeren Espen Barth Eide uttalte til Aftenposten i mai 2022: “Fjorden dør. Vi ser oppblomstring av alt vi ikke vil ha og mister det vi vil ha. Det er menneskeskapt, og det er skapt av oss nordmenn” (Kristiansen, 2022). I følge miljødirektøren i Miljødirektoratet er: “Tilstanden i Oslofjorden er kritisk, og det haster med tiltak” (Miljødirektoratet, 2022c). Årsakene til tilstanden i Oslofjorden er sammensatt og omfattende. (Hansen, 2022).

Masteroppgaven er en del av et tverrfaglig masterprosjekt ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), hvor masterstudenter fra ulike fakulteter har sett på om det er noen tverrfaglige sammenhenger og årsaker til hvorfor tilstanden i Oslofjorden er kritisk. Motivasjonen bak oppgaven er derfor å lære mer om nitrogenfjerning og hvordan vi kan bygge ut fremtidens energieffektive og bærekraftige renseanlegg. Masteroppgaven ser på hvordan man bygge ut nitrogenfjerningsanlegg med Anammox, og fokuserer på Anammox som renseprosess på hovedstrømmen.



Figur 1.1: Bilde tatt i Vollen (Asker) av Oslofjorden. Fotograf: Charlotte Marie Trovaag, 02.05.2023

1.2 Nitrogentilførsel til Oslofjorden

Oppgaven har som formål å se på hvordan en løsning med Anammox-prosessen kan være med på å redusere nitrogentilførselen til Oslofjorden. I 2021 vedtok regjeringen en helhetlig tiltaksplan for Oslofjorden, hvor det er flere mål som er fordelt rundt til kommuner, fylkeskommuner, Statsforvaltere, Miljødirektoratet og flere. For å nå målene i tiltaksplanen må man blant annet forbedre avløpssituasjonen rundt Oslofjorden. Dette betyr at man må være forberedt på strengere rensekrav for landbruket, avløp og i industrien. (Miljødirektoratet, [2022d](#)).

I tiltaksplanen for Oslofjorden fra Regjeringen nevnes det at tilførselen av nitrogen- og fosforpartikler er høy, og på grensen til tålegrensen for Oslofjorden. Vann- og avløpsbransjen har et viktig bidrag for å redusere disse utslippene, men også arbeide med å redusere blant annet direkte overløp til Oslofjorden. I mai 2022 ble det sendt ut et brev fra Statsforvalteren i Oslo og Viken med et varsel om forventende strengere krav knyttet til nitrogenfjerning på renseanleggene (Miljødirektoratet, [2022c](#)). Høsten 2022 ble det et nytt avløpsdirektiv fra EU-kommisjonen presentert. Noen av hovedtrekkene i det nye avløpsdirektivet som er relevant for oppgaven er strengere krav for nitrogenfjerning og et krav om energinøytrale renseanlegg. (Norsk Vann, [2022](#); Klima- og miljødepartementet, [2021](#)).

En forsker fra NIVA (Norsk institutt for vannforskning) André Staalstrøm uttalte til Fagbladet i oktober 2022, at for mye nitrogen er farlig for livet i havet på bakgrunn av at det bidrar til oksygenfattige forhold. Han sa videre: "Vi bruker enorme summer på å samle tilførselen av avløpsvann til renseanlegg, og da er det dårlig butikk å ikke rense nitrogenet". Artikkelen fra Fagbladet presenterer også at biologiske renseanlegg med nitrogenfjerning kan være kostbart og tidkrevende, men samtidig som det er med på å forbedre tilstanden i Oslofjorden. (Grimstad, [2022](#)).

1.3 Problemstilling

Formålet med oppgaven er å se på om nitrogenfjerningsprosessen Anammox kan være et effektivt bidrag for utbygging av energieffektive metoder for nitrogenfjerning, som samtidig skal være tilpasset kaldt klima:

Kan nitrogenfjerningsprosessen Anammox være et effektivt bidrag for å redusere nitrogentilførselen til Oslofjorden?

Problemstillingen legger til grunn for følgende forskningsspørsmål:

1. Basert på eksisterende kunnskap, hvilke erfaringer ligger til grunn for implementering av Anammox-prosessen i Norge?
2. Hvordan kan pilotforsøk bidra til å bekrefte om Anammox-prosessen kan være en effektiv metode for fjerning av nitrogen i mer fortynnet og kaldt avløpsvann?
3. Hvilke forutsetninger er viktig for å oppnå en effektiv fjerning av nitrogen ved bruk av Anammox-prosessen?

1.4 Begrensninger

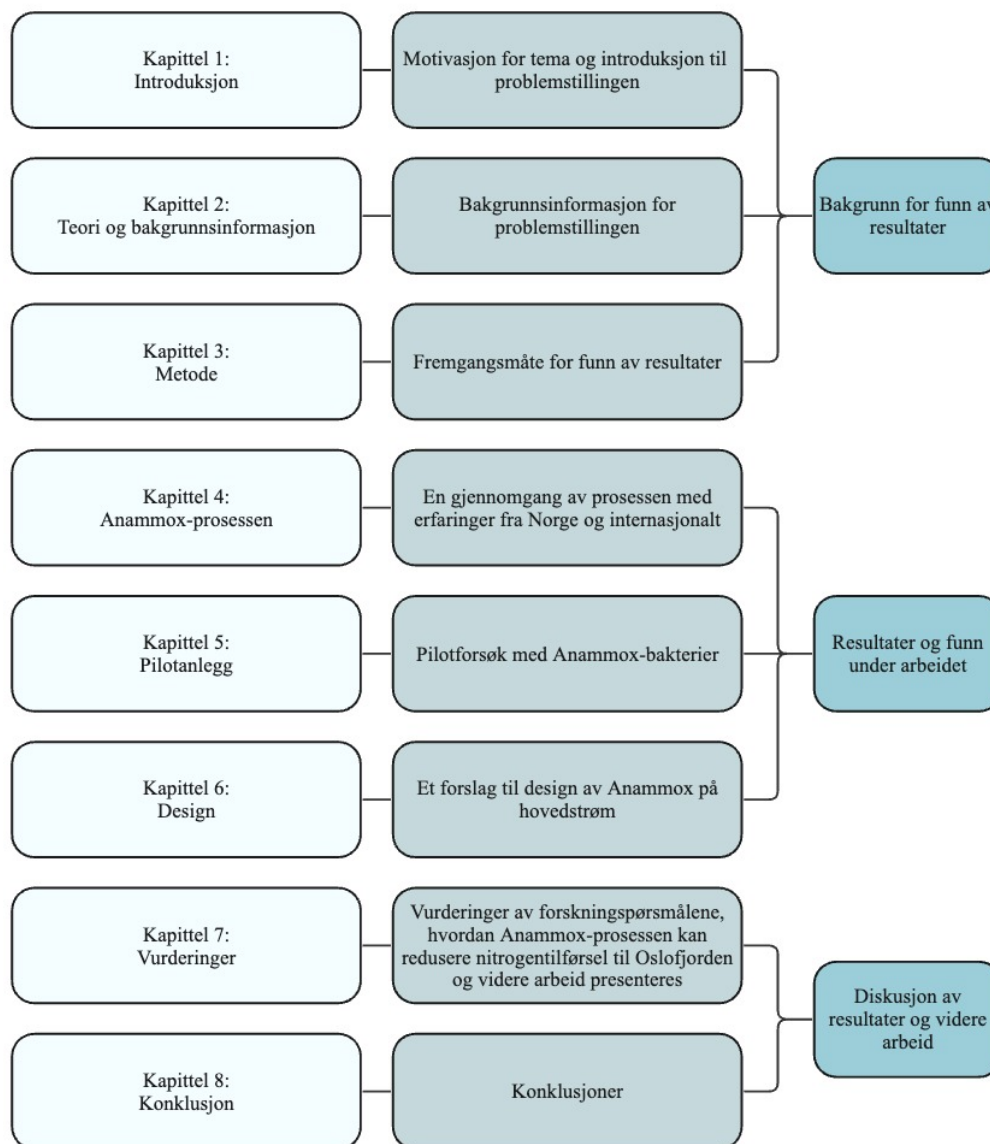
Oppgaven er skrevet i perioden fra januar til mai 2023, så det er en begrensning i omfanget av studien. Hovedfokuset i oppgaven er å se på bruk av Anammox-prosessen i hovedstrømmen, men det er gjort noen vurderinger knyttet til å bruke prosessen som en del av slambehandlingen også. Dette er gjort for å gi et grunnlag for å se om Anammox-prosessen kan være et effektivt bidrag.

Følgende begrensninger er gjort :

1. Leverandørene vil kun bli nevnt i oppgaven og direkte kostnadsvurderinger er ikke vurdert, men økonomisk bærekraft blir diskutert.
2. I oppgaven blir begrepet ”Anammox” benyttet. I noen tilfeller blir ”deammonifisering” benyttet. Deammonifisering er et begrep for Anammox-prosessen, som forklarer at det er en to-steps-prosess, med delvis nitrifikasjon og Anammox-prosess.
3. Oppgaven fokuserer på nitrogentilførselen til Oslofjorden, men det er viktig å underbygge at problemstillingen er sammensatt og at det kan være flere årsaker til at den økologiske tilstanden i Oslofjorden er dårlig. Dette er overførbart til andre sårbare resipienter.
4. Begrensninger knyttet til utvalget av artikler fra litteraturstudien. Kun et utvalg av teknologier for nitrogenfjerning vurderes, men i en fremtidig sammenligning bør man se på flere teknologier for vurderingsgrunnlaget. Fokuset i oppgaven er på biologiske nitrogenfjerningsanlegg med en størrelse på over 10 000 personequivallenter, som er forventet å få strengere krav knyttet til nitrogenfjerning.

1.5 Struktur på oppgaven

Figur 1.2 viser oppsettet av oppgaven. Oppgaven er delt inn i åtte kapitler. Kapittel 1 og 2 tar for seg introduksjon og bakgrunnsinformasjon som er knyttet opp til oppgaven. Videre blir resultatene presentert i Kapittel 4, 5 og 6. I Kapittel 7 gjennomgås det en vurdering av resultater og et diskusjonskapittel med forslag til videre arbeid. Til slutt presenteres konklusjonene basert på funn i oppgaven.



Figur 1.2: Figuren viser strukturen i oppgaven. Kapittel 1 og 2 tar for seg introduksjon og bakgrunnsinformasjon som er knyttet opp til oppgaven. Videre blir resultatene presentert i kapittel 4, 5 og 6. I kapittel 7 gjennomgås det en vurdering av resultater og et diskusjonskapittel. Til slutt presenteres konklusjonene basert på funn i oppgaven og noen refleksjoner for arbeidet som har blitt gjort og videre arbeid.

2. Teori og bakgrunnsinformasjon

I kapitlet presenteres relevant bakgrunnsinformasjon. Teorikapitlet er delt inn i tre deler, hvor den første delen presenterer bakgrunnen for tematikken, med en gjennomgang av relevante regelverk for problemstillingen. For å gi et grunnlag for problemstillingen er det presentert informasjon om nitrogentilførselen til Oslofjorden. Neste del tar for seg nitrogenfjerning i Norge og til slutt blir det presentert et forslag til faktorer man bør tenke på ved utbygging av fremtidens renseanlegg for nitrogenfjerning. Kapitlet legger til grunn for problemstillingen. Til slutt i kapitlet er det en teknisk gjennomgang av Anammox-prosessen.

2.1 Bakgrunn for tematikk

Delkapitlet tar for seg regelverk med et fokus på nitrogenfjerning. Deretter presenteres mulige årsaker til hvorfor man bør fjerne nitrogen fra Oslofjorden, før en gjennomgang av nitrogenkretsløpet som legges til grunn for prosessene innenfor nitrogenfjerning.

2.1.1 Vanndirektivet og forurensningsforskriften

Det stilles krav til god og bærekraftig forvaltning av vannressursen. Vanndirektivet er et samarbeid mellom EU-kommisjonen og EU/EØS-landene. Direktivet omfatter blant annet drikke-, avløps-, og overvann. Hensikten med Vanndirektivet er å sikre en helhetlig, bærekraftig og god beskyttelse for vannmiljøet, ved å lage tiltaksplaner og iverksette aktuelle miljøtiltak. (Vannportalen, [udatert](#)).

Renseanleggene må følge forurensningsforskriften og hensikten med forskriften er å minimere forurensning til miljøet. Forurensningsforskriften, som ble satt i kraft i 2004, definerer forskjellige krav blant annet ut ifra størrelse på anlegget og resipienter. Kapittel 14 omhandler forurensningsforskriften: "tettbebyggelse med samlet utslipp større enn eller lik 2000 pe til ferskvann, større enn eller lik 2000 pe til elvemunning eller større enn 10.000 pe til sjø" (Lovdata, [2023](#)). Videre er kravet for kapittel 14 anlegg en renseseffekt på 70%, men forurensningsmyndighet, Statsforvalter, kan være med på å bestemme i utslippstillatelsen. (Lovdata, [2023](#)).

2.1.2 Forslag til et oppdatert avløpsdirektiv

Det foregår nå en revisjon av avløpsdirektivet fra 2007, som kan føre til strengere rensekrav for renseanlegg rundt Oslofjorden. Høsten 2022 ble det foreslått et nytt og revidert avløpsdirektiv fra EU-kommisjonen. Det er forventet at prosessen med det nye avløpsdirektivet er ferdig til våren 2024. Regelverket skal deretter behandles før det blir implementert i norsk regelverk. Forslaget inkluderer blant annet et forslag til krav om renseseffekt for nitrogen på 85% eller maksimalt utslipp av nitrogen på 6 milligram per liter. I tillegg kommer et krav om fjerning av mikroforurensninger og et mål om energinøytrale renseanlegg. (Norsk Vann, 2022; Lyngstad, 2023; Regjeringen, 2023).

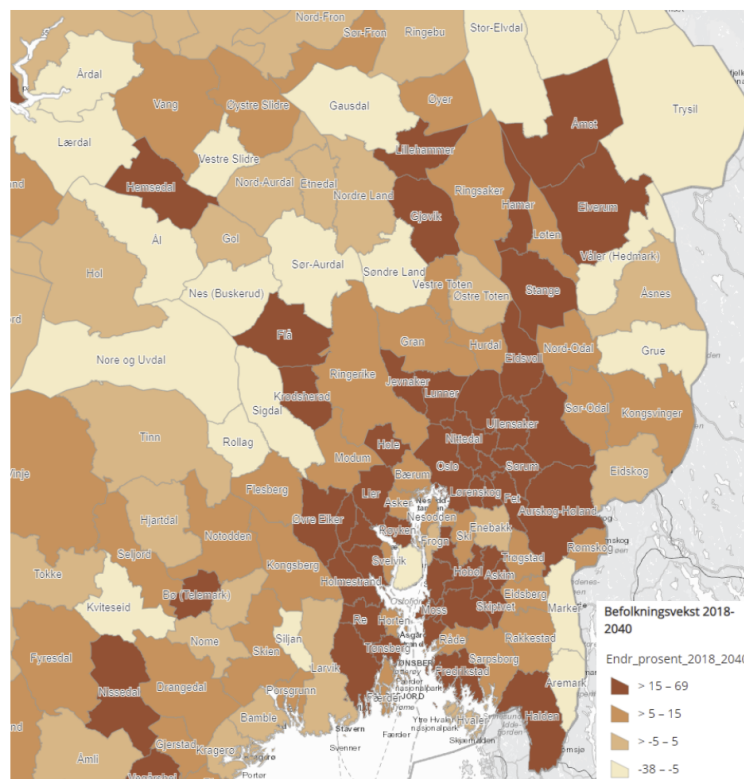
Norsk vann, sammen med flere renseanlegg, har sendt inn en uttalelse til endringer i det nye avløpsdirektivet som ble presentert i fjor høst. Det er enighet om behov for modernisering, oppdatering og revidering av dagens avløpsdirektiv. Uttalesen som ble sendt inn presiserer at man bør se på rens tiltak ut fra vannforekomst. Kravene i det nye avløpsdirektivet er omfattende, og det stilles også krav til energinøytralitet og et effektivt energiforbruk for avløpsbransjen innen 2040. De nye kravene vil også muligens kreve et større areal, og som Norsk Vann skriver vil en økning fra 70% til 80% kreve et økt luftbehov på 10% og økt karbonkilde med 60%. Ved implementering av det nye avløpsdirektivet med strengere krav, kan man forvente et behov for økt kompetanse og videreutvikling av ny teknologi. (Lyngstad, 2023; Miljødirektoratet, 2022a).

Det nye avløpsdirektivet tilsier at det vil bli behov for oppgradering av mange renseanlegg i Norge. Det er kun, per nå, seks anlegg i Norge som har nitrogenfjerning. Det forventes at alle renseanlegg (over 10 000 pe) tilknyttet et nedbørfelt til en sårbar resipient, som Oslofjorden, kan få krav om nitrogenfjerning. Det er også et forslag til et krav om at anlegg over 100 000 pe, kan få 80% reduksjon av utvalgte mikroforurensninger, herunder flere typer legemidler. (Norsk Vann, 2022, Lyngstad, 2023; Miljødirektoratet, 2022a).

2.1.3 Oslofjorden som resipient

Oslofjorden kan betegnes som en følsom resipient. Dette baserer seg på forurensningsforskriften hvor det står det at: "Mottar store mengder næringsstoffer (...), skal fosfor og/eller nitrogen fjernes med mindre det påvises at fjerning ikke vil ha noen innvirkning på eutrofieringen" (Lovdata, 2023).

Høy nitrogentilførsel til Oslofjorden kan føre til eutrofiering. Eutrofiering betyr økt algeoppblomstring og økte konsentrasjoner av næringsstoffer i resipienten kan føre til oksygenfattig vann, ved at oksygen blir brukt opp på grunn av gode vekstvilkår. Eutrofiering kan både forårsakes naturlig og påtvunget, hvor nitrogen fra avløpsvann og fra landbruket omtales ofte som påtvunget eutrofiering. I marine miljøer som Oslofjorden, er ofte nitrogen den begrensede faktoren for algeoppblomstring, mens det er fosfor i ferskvannsresipienter. (Kjensmo og Hongve, 2022).

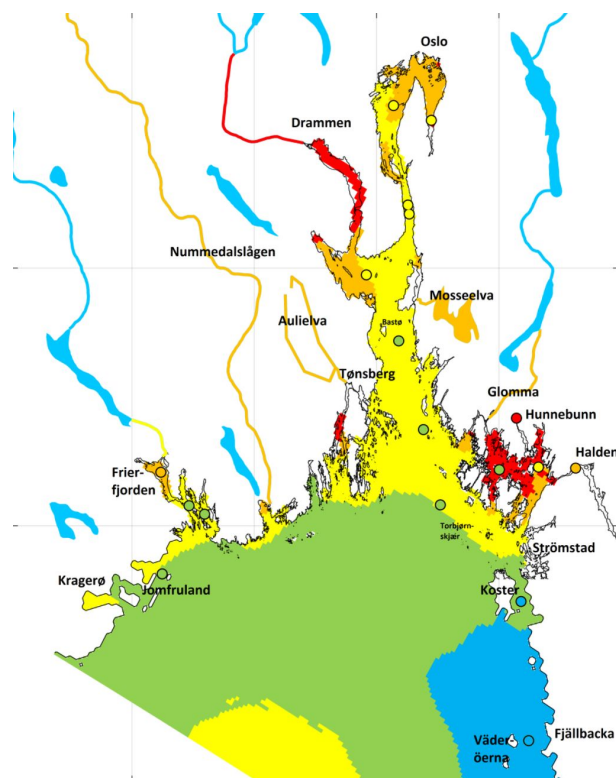


Figur 2.1: Figuren viser befolkningsvekst fremover i Oslo. (Staalstrøm mfl., 2022).

Oslofjorden deles inn i indre og ytre Oslofjord. Skillet går ved Drøbak, hvor indre Oslofjord er nord for Drøbak. Drøbaksundet har bare 19 meter dyp i motsetningen til indre Oslofjord som har en dybde på omtrent 120 meter. På grunn av mindre dybde ved Drøbak, blir vannutvekslingen mellom indre og ytre Oslofjord begrenset. Definisjonsområdet for Ytre Oslofjord er fra Færder fyr til Hurumlandet. Oslofjorden er en stor fjord, omtrent 100 kilometer lang. I tillegg til å være et rekreasjonsområde for mange er det mye trafikk i Oslofjorden. Det er en betydelig befolkningsvekst i området. Figur 2.1 viser den forventende økningen mellom 2018 og 2040, noe som indikerer at Oslofjorden er en resipient som må forvaltes riktig fremover med tanke på forventet økt utslipp. (Thorsnæs, 2021, Askheim, 2021, Staalstrøm mfl., 2022).

2.1.4 Nitrogentilførsel til Oslofjorden

Avløp og landbruk er noen av de største forurensningskildene til Oslofjorden. Det tilføres omtrent 19 000 tonn biotilgjengelig nitrogen til Oslofjorden hvert år, i følge en rapport som ble gitt ut av NIVA (Norsk institutt for vannforskning) i 2022. Rapporten nevner at omtrent 30% av biotilgjengelig nitrogen kommer fra rensesanleggene, mot cirka 40 % fra landbruket. Nitrogentilførselen har økt signifikant siden førindustriell tid, og en av årsakene som nevnes er befolkningsvekst. (Staalstrøm mfl., 2022)

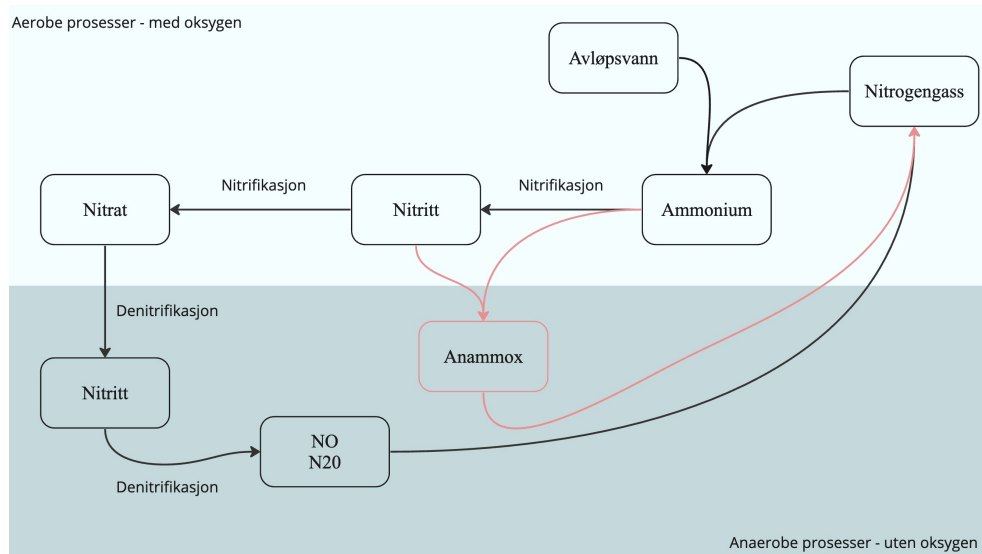


Figur 2.2: Oversikt over nivået av nitrogen rundt Oslofjorden. Her betyr rødt høye verdier, mens blå lave verdier av nitrogen. Verdiene er målt av nitrat og nitritt i sommerperioden 2017-2019. (Staalstrøm mfl., 2022; Grimstad, 2022)

Figur 2.2 viser et kart over nitrogennivået i Oslofjorden. Her vises verdiene av nitritt og nitrat, og hvordan nitrogennivået varierer. De røde områdene er hvor det er høye nitrogennivåer, som blant annet er tilfellet i Drammensfjorden. Mot svenskegrensen kan man se at det er blått, som indikerer at det er målt lave verdier av nitrogen i vannmassene i dette området. Rapporten nevner områder som Hunnebunn og Iddefjorden som problemområder i Oslofjorden. Her er det høy tilførsel av nitrogen og i Iddefjorden nevner NIVA-rapporten at det blir tilført omtrent 595 tonn nitrogen hvert år, hvor 25% av nitrogenet kommer fra rensesanleggene. (Staalstrøm mfl., 2022; Grimstad, 2022)

2.1.5 Nitrogenkretsløpet

Nitrogen er en komponent som er nødvendig for alle levende organismer. Omtrent 80% av luften inneholder nitrogen på formen som nitrogengass, en luktfri og fargeløs gass. Denne bindingen er sterk, og nitrogen i gassform er ikke tilgjengelig for planter eller dyr. Nitrogenkretsløpet bidrar til å gjøre nitrogen tilgjengelig for alle organismer. Avløpsvannet inneholder ulike former for nitrogen. Det meste av nitrogenet kommer fra urea, fra urin, som hydrolyseres til ammonium. I innløpet til rensanleggene er nitrogen som regel på formen ammonium. (Aarnes, 2023; Kofstad mfl., 2023; Universitetet i Oslo, udatert; Kjeldsen og Bedin, 2020; Ødegaard, 2014).

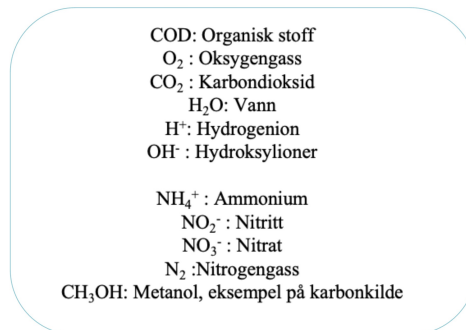


Figur 2.3: Figuren viser en forenklet illustrasjon av nitrogenkretsløpet, hvor prosessen med Anammox-bakterier er presentert i rosarødt. NO (nitrogenoksider) og N₂O (lystgass). Med inspirasjon fra (WRF (The Water Research Foundation), 2019).

Figur 2.3 viser en forenklet illustrasjon av nitrogenkretsløpet. Nitrogen kan være på ulike former og danner forbindelser med ulike atomer, som gir nye og forskjellige molekyler. For eksempel kan det skje en reaksjon mellom oksygen og nitrogen hvor det blir dannet klimagassen lystgass (N₂O). Nitrogenkretsløpet finnes både i jordens, ferskvanns, innsjøenes og i marine økosystemer. Kretsløpet skjer gjennom flere prosesser: nitrifikasjon, denitrifikasjon, nitrogenfiksering, ammonifisering, nitrogenassimilasjon, anaerob ammoniumoksidasjon. Prosessene nitrifikasjon, denitrifikasjon og anaerob ammoniumoksidasjon bli forklart nærmere, da dette er sentrale prosesser for nitrogenfjerning. (Kjeldsen og Bedin, 2020, Aarnes, 2023).

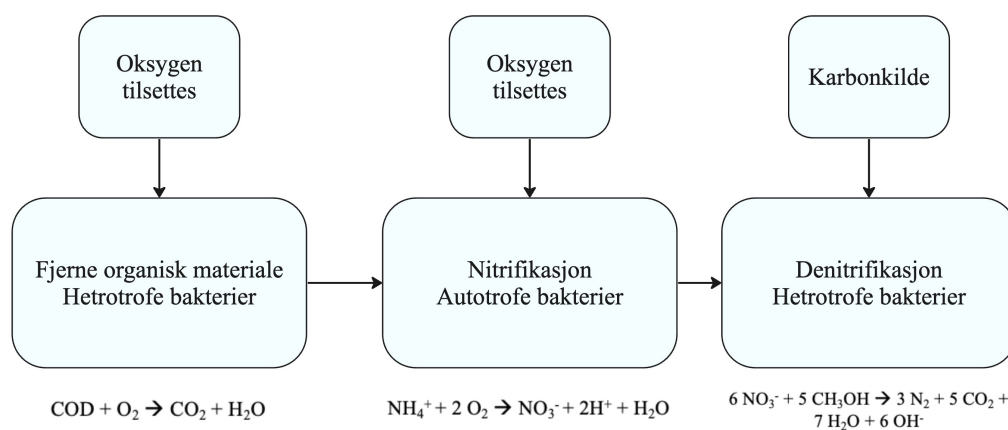
2.1.6 Biokjemiske prosesser for nitrogenfjerning

Relevante symboler er vist i Figur 2.4. Dette er aktuelle symboler som blir benyttet videre i oppgaven:



Figur 2.4: Figur som forklarer de kjemiske symbolene som har blitt benyttet

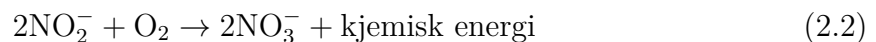
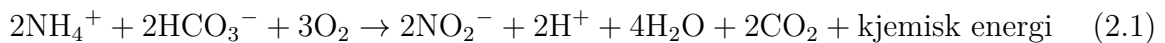
Figur 2.5 viser et forenklet illustrasjon av et nitrogenfjerningsanlegg, med tilhørende reaksjonslikninger. Her illustreres nitrogenfjerning med et steg for å fjerne organisk stoff, før nitrifikasjon og denitrifikasjon. Denitrifikasjonssteget kan være før eller etter nitrifikasjonssteget. For- og etter-denitrifikasjon har ulike fordeler. Fordelen med å benytte for-denitrifikasjon er muligheten for å benytte organisk stoff i avløpsvannet som karbonkilde, istedenfor å tilsette en ekstern. Men dette vil kreve resirkulering av nitrat. Et forslag for å øke den totale renseseffekten er å benytte en kombinasjon. (Ødegaard, 2022, 2014).



Figur 2.5: Viser et forslag til en nitrogenfjerningsprosess, med etter-denitrifikasjon. Inspirasjon fra (Ødegaard, 2022)

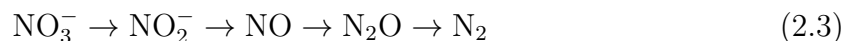
Nitrifikasjon

Nitrifikasjon er en prosess hvor ammonium blir oksidert til nitritt, og videre til nitrat gjennom to delprosesser. Symbolene som blir benyttet er beskrevet i Figur 2.4. Nitrifikasjon, som beskrevet i Reaksjonslikning 2.1, omdanner ammonium til nitritt under aerobe forhold (oksygen til stede). Det er et sammensatt økosystem, men det er hovedsakelig bakteriene *Nitrosomonas*, *Nitrospira* og *Nitrosococcus* som er til stede. Nitritt blir videre oksidert til nitrat, som Reaksjonslikning 2.2 viser. Hvis man ikke implementerer nitrifikasjonssteget på et renseanlegg, vil denne prosessen skje i resipienten. Nitrifisering fører til en alkalitetssenkning og pH-verdien reduseres. Natriumbikarbonat kan tilsettes for å øke alkaliteten. Bakteriene som oksiderer ammonium og nitritt er autotrofe. Det vil si at de benytter karbondioksid som karbonkilde, og organisk stoff bør være lavt i reaktoren. Bakteriene er også saktevoksende bakterier, som gir en lav slamproduksjon. (Aarnes, 2023; Ødegaard, 2014)



Denitrifikasjon

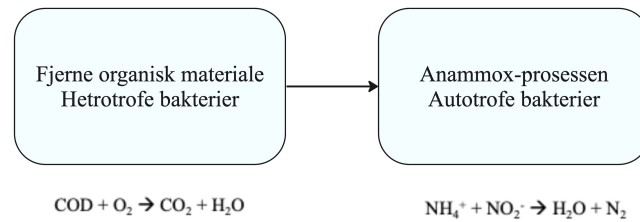
Nitritt og nitrat blir videre redusert i denitrifikasjonsprosessen under anaerobe (oksygen ikke til stede). Forholdene i reaktoren kan også omtales om anoksiske, ved at prosessen er avhengig av en tidligere prosess som har foregått under aerobe forhold. Denitrifikasjonsprosessen er avhengig av en energi- og karbonkilde. Metanol er et eksempel på en karbonkilde som kan benyttes, men det er også mulig å benytte for eksempel organisk stoff fra avløpsvannet. I denitrifikasjonsprosessen blir nitrat videre omdannet til nitrogengass, slik Reaksjonslikning 2.3 viser (Aarnes, 2023), gjennom flere mellomprosesser. For eksempel så blir drivhusgassen lystgass (N_2O) produsert som et mellomprodukt i reaksjonen. (Ødegaard, 2014).



Endogen respirasjon kan også forekomme istedenfor å benytte en karbonkilde. Definisjonen til Norsk Vann er: "Nedbrytning av lagringsprodukter eller annet cellemateriale ved ånding. Endogen respirasjon spiller primært en rolle ved utilstrekkelig næringstilgang" (Norsk Vann, 2023a). Bakteriene i et økosystem kan dermed også benytte biomasse fra døde celler som næring, som gjør at det ikke er nødvendig å tilsette karbon fra en karbonkilde.

Anammox (anaerob ammoniumoksidasjon)

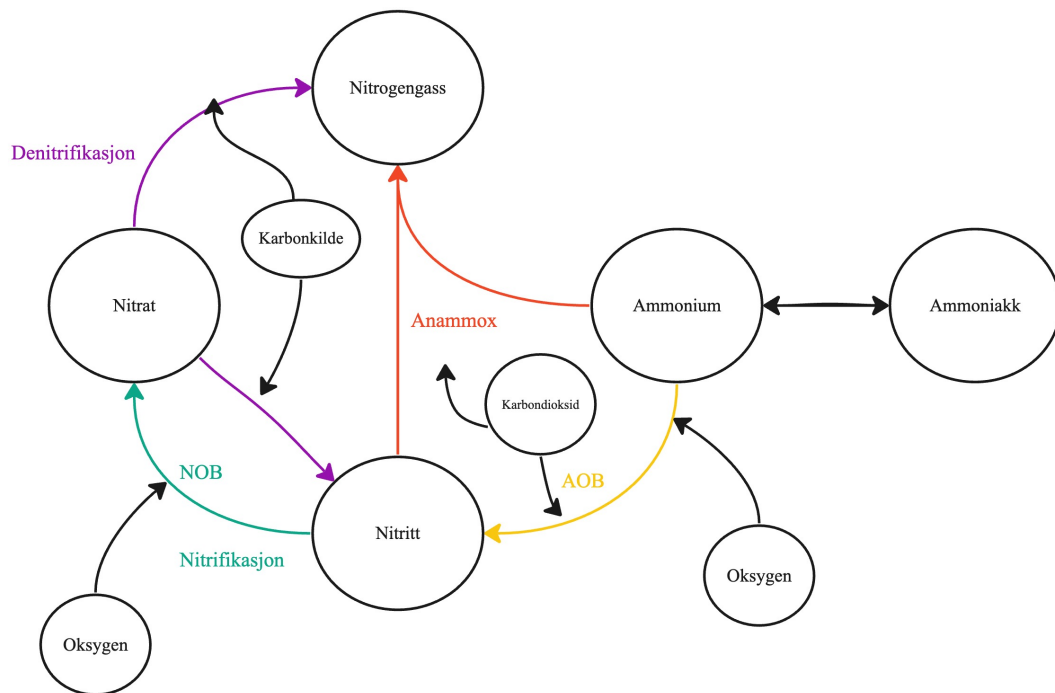
Anammox-prosessen (anaerob ammoniumoksidasjon) er en nitrogenfjerningsprosess. Gruppen bakterier som utfører prosessen er i divisjonen *Planctomycetes*. De er saktevoksende, og ble først oppdaget ved rensenanlegget i Delft. Her fant de ut av at nitritt kunne bli benyttet som elektronakseptor. Bakteriene er autotrofe og benytter karbon fra karbondioksid for cellevekst. (Aarnes, 2023, 2020)



Figur 2.6: Prosessen viser en et-steps-Anammox-prosess hvor både delvis nitrifikasjon og Anammox-prosessen foregår i steg 2. Her vil det foregå en nitrifikasjonsprosess i forkant for å danne nitritt. Teknisk gjennomgang av prosessen og mer oversiktlig figur er vist i Figur 2.7. (Ødegaard, 2022; Aarnes, 2023)

2.1.7 Teknisk gjennomgang av Anammox-prosessen

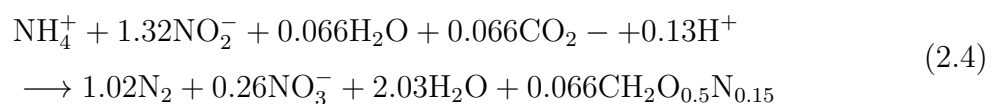
Bakteriene i Anammox-prosessen ble oppdaget på 1990-tallet av forskere i Nederland og sammen med firmaet Paques, ble teknologien Anammox® lansert. I senere tid ble det oppdaget at det også er ammoniumoksidierende bakterier (AOB) tilstede i prosessen, som førte til det nye begrepet "deammonifisering". Her foregår både delvis nitrifisering med AOB, og anaerob ammoniumoksidasjon (Anammox-bakterier). (Atkinson, 2013).



Figur 2.7: Viser en teknisk gjennomgang av ulike prosesser som kan forekomme i en biologisk renseprosess. Inspirasjon fra litteratur. (WRF (The Water Research Foundation)., 2019; Angeltvedt mfl., 2022)

Figur 2.7 viser Anammox-prosessen forklart (i rødt). Anammox-prosessen foregår under anaerobe forhold, altså oksygenfattige forhold. Det kan være oksygen tilstede i prosessen, men ikke i kontakt med Anammox-bakteriene. Anammox-bakteriene er autotrofe og benytter karbon fra karbondioksid for cellevekst. Dette reduserer behovet for å tilsette en ekstern karbonkilde, i motsetning til biologiske nitrogenfjerningsprosesser med denitrifikasjon. I det første steget, delvis nitrifisering, blir ammonium omdannet til nitritt, som vist i Figur 2.7, ved bruk av ammoniumoksiderende bakterier (AOB). Videre blir nitritt benyttet som elektronakseptor når Anammox-bakteriene omdanner ammonium til nitrogen. (Tchobanoglous mfl., 2014).

Den kjemiske reaksjonslikningen for Anammox-prosessen er beskrevet i 2.4. Det er flere mellomsteg i biokjemiske prosesser, men den kjemiske reaksjonslikningen viser overordnet hva som skjer i Anammox-prosessen. Det er som nevnt tidligere, nødvendig med tilstedeværelse av nitritt. Prosessen forbruker protoner og produserer alkalitet. (Tchobanoglous mfl., 2014; Strous mfl., 1998).



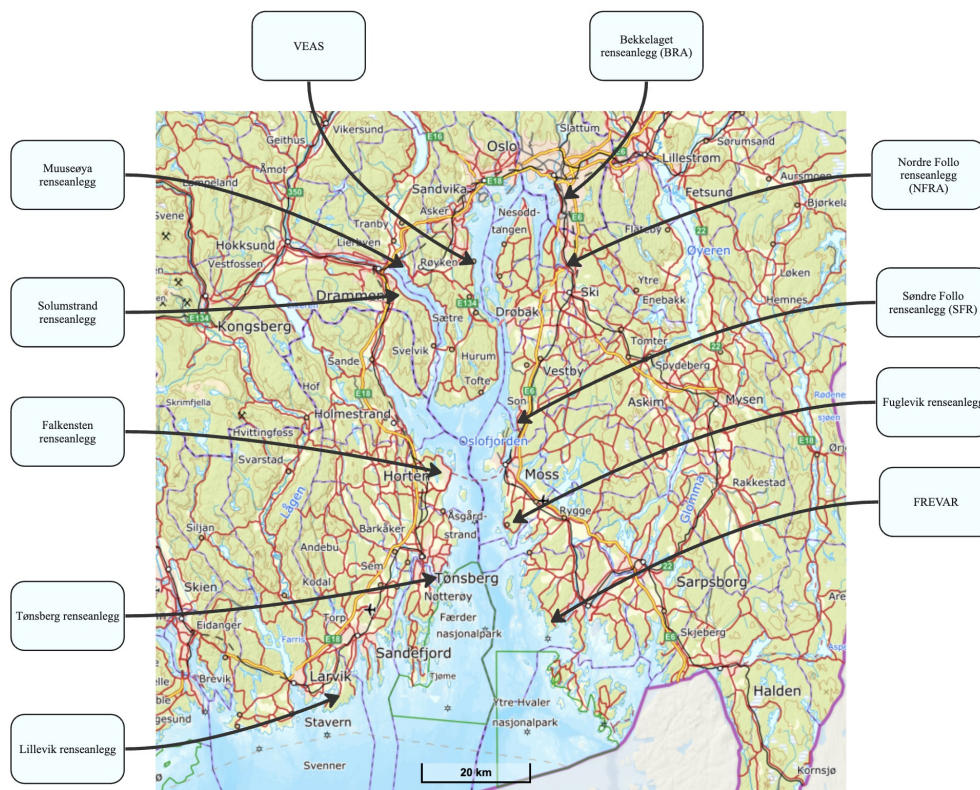
2.1.8 Veksthastigheten til biologiske renseprosesser

Det er ulike faktorer som kan påvirke veksthastigheten til biologiske renseprosesser. Bakteriene har forskjellige abiotiske faktorer og mikroorganismene trenger næringsstoffer for å omdanne seg. Fosfor kan for eksempel bli et begrensende stoff, hvis man har et trinn med kjemisk felling i forkant av den biologiske renseprosessen. Ulike temperaturer vil også påvirke veksthastigheten. Det kan forventes en dobling av anleggstørrelsen ved en temperatursenking på omtrent ti grader. Andre faktorer som kan påvirke prosessen er oksygen, pH-verdien, alkalitet eller for eksempel inhiberende stoffer fra industriavløp. (Ødegaard, 2014).

Faktorer som vil påvirke Anammox-prosessen kan være blant annet nitritt, oksygenkonsentrasjon, pH-verdien. Ønskelig pH-verdi for prosessen ligger på mellom 6.7-8.3, hvor det er ønskelig med en pH-verdi på 8. Nitritthemming er også et problem for Anammox-prosessen, som påvirkes av prosessstyringen. Oppløst oksygen i reaktoren er også et forhold som kan påvirke prosessen. (Tchobanoglous mfl., 2014; Strous mfl., 1999)

2.2 Nitrogenfjerning i Norge

I dag er det seks anlegg som har nitrogenfjerning i Norge: VEAS, Bekkelaget, Nordre Follo, Nedre Romerike, Gardermoen og Lillehammer (Ødegaard, 2022). Det bygges ut flere renseanlegg i dag, for eksempel i Fredrikstad som er estimert ferdig i 2026 (FREVAR KF, 2023). Samtidig som det er forventet at anleggene rundt Oslofjorden vil få strengere krav knyttet til nitrogenfjerning, mottar Oslofjorden avløpsvann fra vassdrag som Drammensdraget og Glomma. Renseanlegg som enten har direkte eller indirekte tilknytning til Oslofjorden, kan derfor mulig bli omfattet av det nye avløpsdirektivet. Figur 2.8 viser en oversikt over noen av renseanleggene i nærheten av Oslofjorden.

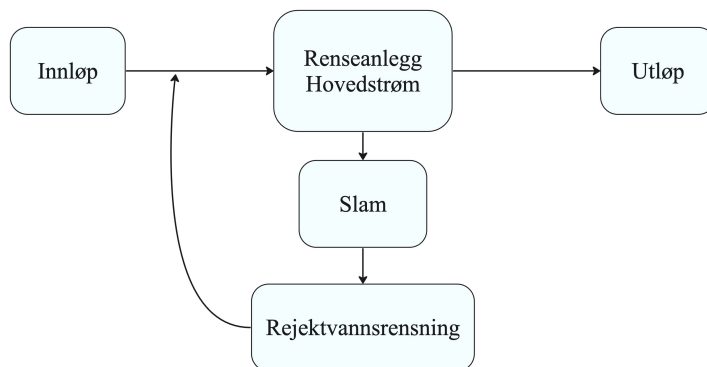


Figur 2.8: Viser en oversikt over reaseanlegg rundt Oslofjorden.

2.2.1 Avløpsrensing

Hensikten med et reaseanlegg er å sikre forsvarlig håndtering av avløpsvann og redusere utslippene til miljøet. Avløpsvannet består av blant annet næringsstoffer som fosfor og nitrogen, i tillegg til smittestoffer og søppel. Avløpsvann fra industri, husholdninger og offentlige bygninger transporteres gjennom et rørsystem og behandles på reaseanleggene. Etter at vannet er forbedret til ønsket kvalitet slippes det ut til resipienten, som kan være for eksempel Oslofjorden. (Miljødirektoratet, [udatert](#)).

Avløpsvann kan inneholde store mengder med fremmedvann, som kan være overvann eller vann fra snøsmeltningsperioder. Problemet med økt fremmedvann kan føre til kapasitetsproblemer, driftsproblemer og økte kostnader for reaseanleggene. Mye overvann inn til reaseanleggene fører også til at effektiviteten til biologiske reaseprosesser kan bli minimert. Fremmedvann kan inneholde forurensninger, som kan innvirke på reaseprosessen og føre til dårligere kvalitet på avløpsslammet. Derfor er det ønskelig å redusere mengden med fremmedvann. (Norsk Vann, [2023b](#); Miljødirektoratet, [2022b](#)).

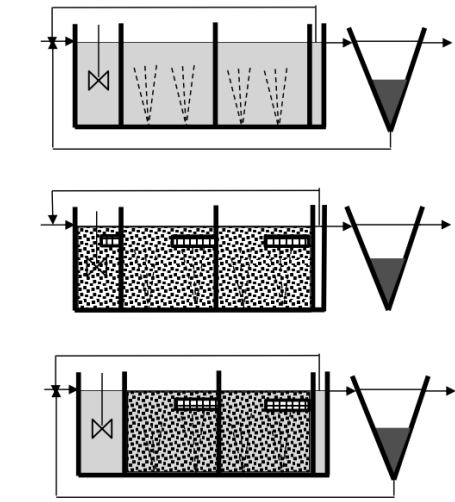


Figur 2.9: Figuren viser en forenklet oppbygging av et renseanlegg, hvor innløpet består av vannet som har blitt transportert til renseanlegget. Videre renses vannet gjennom flere rensessteg i hovedstrømmen, før rensed vannet slippes ut i resipienten. Renseprosessen genererer slam, som kan behandles i ulike prosesser, dersom anlegget har tilhørende slambehandling. Vannet fra slammet kan renses gjennom prosesser, og deretter bli transportert tilbake til for eksempel innløpet.

Renseanleggene benytter ulike prosesser for å håndtere og rens avløpsvannet. Figur 2.9 viser et eksempel på oppbyggingen av et renseanlegg. Rensingen kan gjøres gjennom mekaniske, biologiske og kjemiske rensprosesser, og er ofte kombinasjoner av disse. Noen anlegg har også en tilhørende slamprosess, hvor man kan produsere biogass eller gjødsel. Innløpet til renseanleggene inneholder som regel nitrogen som ammoniakk og ammonium. Hensikten i dag er å omdanne nitrogen fra fast form til gassform. Det finnes både biologiske og fysisk/kjemisk prosesser for å fjerne nitrogen fra avløpsvannet. Ammonium avdrivning, magnesium-ammonium-fosfatfelling eller ionebytting er eksempler på fysisk/kjemiske metoder. Biologiske metoder for nitrogenfjerning kan være for eksempel nitrifikasjon etterfulgt av denitrifikasjon, eller anaerob ammonium oksidasjon (Anammox). (Ødegaard, 2022).

På 1990-tallet ble forskningsprogrammet om fjerning av næringsstoffer fra avløpsvann (FAN-programmet) utviklet med hensikt i å bidra med utviklingen av kompetansen for nitrogenfjerning i Norge, gjennom ny teknologiutvikling. I tillegg til anbefalinger om løsninger for fjerning av næringsstoffer fra avløpsvann og økonomisk grunnlag. På bakgrunn av dette førte det til en utbygging av noen nitrogenfjerningsanlegg, som blant annet VEAS (Vestfjorden Avløpssekskap) og Bekkelaget Renseanlegg. (Ødegaard, 1992).

Eksempler på nitrogenfjerningsanlegg

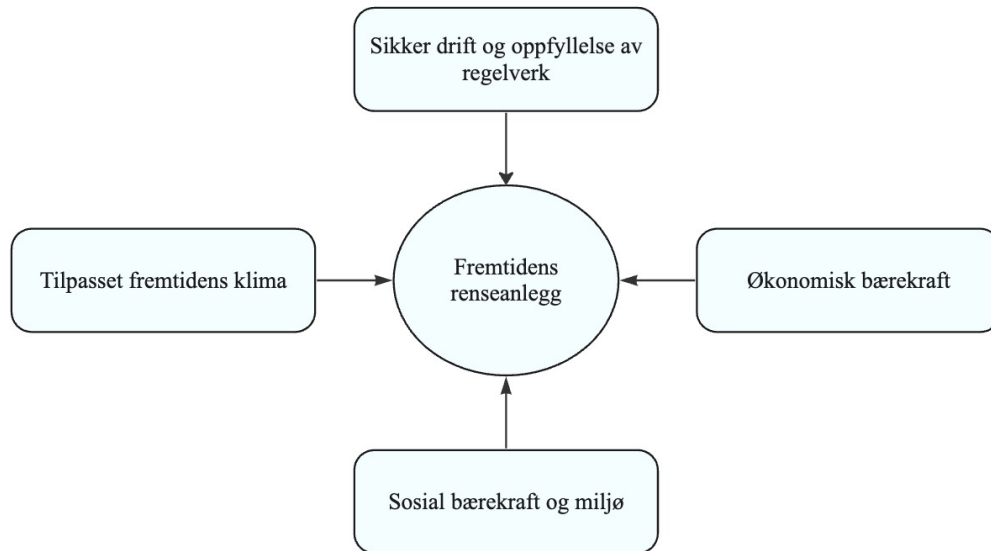


Figur 2.10: Figuren viser tre ulike forslag for biologiske renseprosesser. Hentet fra (Ødegaard, 2022)

Figur 2.10 viser tre ulike biologiske renseprosesser for å fjerne nitrogen. Det er vanlig å skille mellom aktivslam- og MBBR-systemer. Aktivslam-systemer, illustrert i øverste i figuren, baserer på at en del av suspenderte biomassen sendes tilbake til starten av prosessen. Illustrasjonen i midten illustrerer et MBBR-system, som står for Moving Bed Biofilm Reactor. Biomassen er fastsittende på biomediene (plastikkbrikkene) i prosessen, så biomassen holdes igjen i reaktoren. For aktivslam-systemer er det nødvendig å bruke sedimentering eller membranfiltrering i etterkant, i motsetning til MBBR-systemer. Den nederste illustrasjonen illustrerer et IFAS-system, hvor det både er fastsittende og suspenderte biomasse. (Ødegaard, 2022).

Det mikrobielle økosystemet i en biologisk reaktor bør studeres nærmere, ved at det er flere prosesser som kan foregå. Dette kan gjøres ved DNA-sekvensering. Det finnes ulike metoder for dette, men hensikten er å finne baseparene i arvestoffet DNA og dette gjør man for å gjenkjenne ulike DNA. Bakteriene vil ha ulikt DNA, noe som gjør at ved en DNA-sekvensering kan man få en oversikt over hvilke bakterier som er i biologiske renseprosesser. (Haugen og Sonnenberg, 2021).

2.3 Utbygging av fremtidens renseanlegg for nitrogenfjerning



Figur 2.11: Fokusområder for fremtidens miljøpositive og energieffektive renseanlegg. Figuren blir i Kapittel 7 diskutert om hvordan bruk av Anammox-prosessen kan være en løsning.

Figur 2.11 viser fire ulike punkter som kan være viktig å ta i betraktning når man skal bygge ut fremtidens renseanlegg: Klima og miljø, økonomisk bærekraft, sosial bærekraft og imøtekomme fremtidens klima. Våren 2023 ble det gitt ut den sjette og siste rapporten fra FN-Sambandet. I rapporten presenteres det at det er viktig å gjøre tiltak nå, for å få ned de høye utslippene. Det nevnes at man må være forberedt på mer ekstremnedbør fremover, i tillegg til at havet vil stige og at det blir varmere temperatur på jorden. (Miljødirektoratet, 2023; FN-SAMBANDET, 2023).

Bærekraftige forretningsmodeller er et sentralt punkt når det gjelder utbyggingen av fremtidens renseanlegg. Både sosial og økonomisk bærekraft, kan ha effekter på forvaltningen av fremtidens renseanlegg. Sosial bærekraft defineres som: "Sosialt bærekraftige samfunn handler om samfunn preget av tillit, trygghet, tilhørighet og tilgang til goder som arbeid, utdanning og gode nærmiljø" (FHI, 2020). For vannbransjen er det viktig å tilrettelegge for gode nærmiljøer, blant annet ved å minimere lukt fra renseanleggene og redusere forurensninger. (NHO, 2020).

Figur 2.11 viser flere faktorer som man bør ta hensyn til ved utbygging og implementering av nitrogenfjerningsanlegg. I tillegg å fokusere på sikker drift av rensesanlegget og å følge renskravene som er definert i utslippstillatelsen, er for eksempel kostnader og investeringer faktorer som også kan påvirke valg av rensesprosess. I vurderingskapitlet blir det svart på fordeler og ulemper med Anammox-prosessen vurdert opp mot faktorene i Figur 2.11. (Lyngstad, 2023).

Utbygging av fremtidens rensesanlegg bør samsvare med De Forente Nasjoners (FNs) bærekraftsmål. Arbeidet som gjennomføres for å sikre et bærekraftig samfunn frem mot 2030, har stor betydning for arbeidet i vannbransjen. Seks sentrale mål tilknyttet problemstillingen blir presentert i Figur 2.12. Figuren viser at det er nødvendig å sikre rent vann og livet i havet, men at dette bør gjennomføres på en ansvarsfull måte for å være med å samarbeide om å stoppe klimaendringene. I tillegg bør det oppmuntres til innovasjon for å finne gode løsninger for nitrogenfjerning slik at det er i tråd med bærekraftmålene. (FN-Sambandet, 2023).

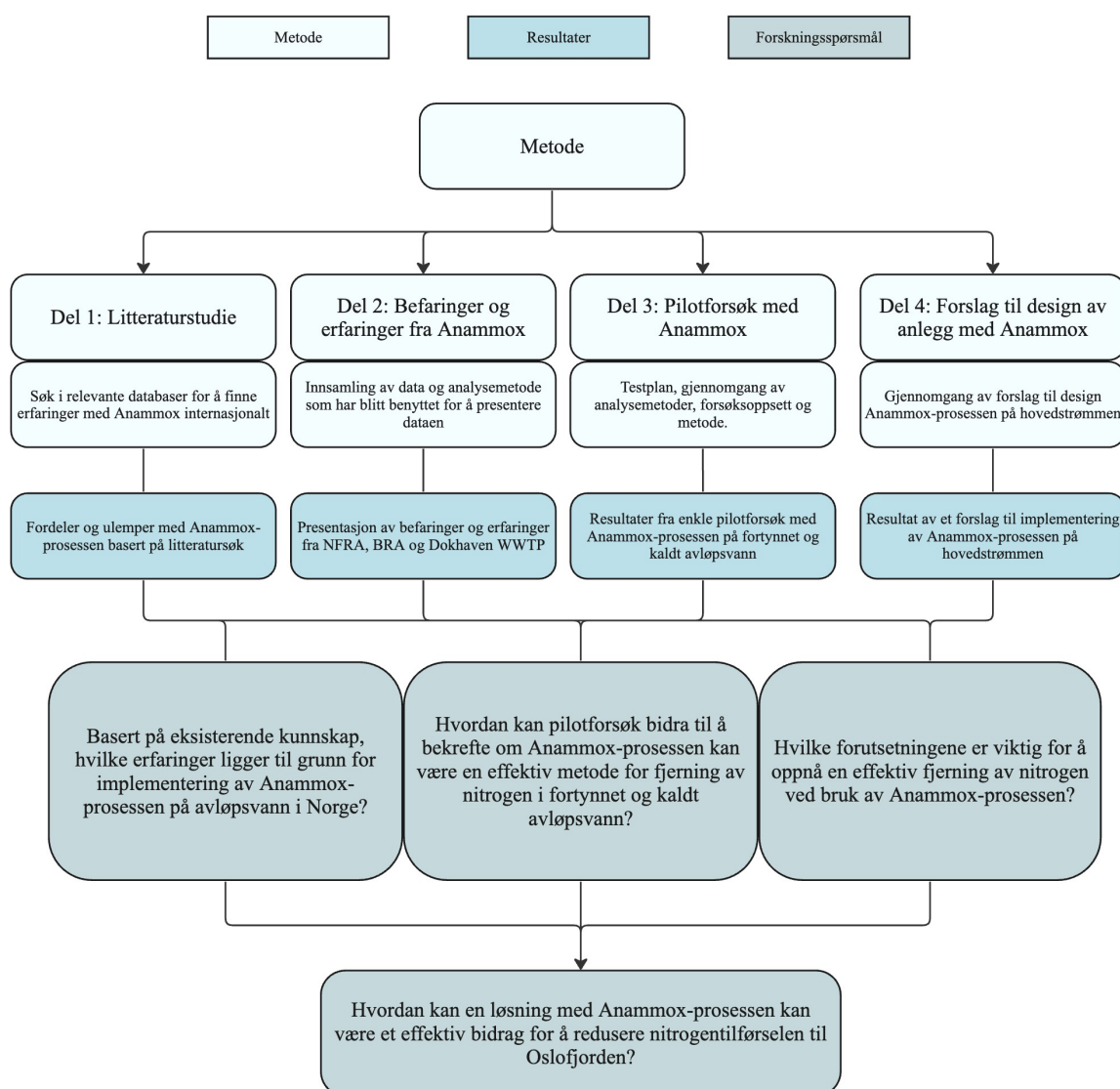


Figur 2.12: Bærekraftsmålene som kan være relevante for studien. Teksten er skrevet og hentet fra (FN-Sambandet, 2023).

2.4 Oppsummering av kapittel

I kapitlet har det blitt presentert relevant teori og bakgrunnsinformasjon. Dagens kunnskapsnivå om Anammox-prosessen presenteres under Kapittel 4. I neste kapittel blir beskrivelsen for valg av metode for å undersøke problemstillingen: "Kan nitrogenfjerningsprosessen Anammox være et effektivt bidrag for å redusere nitrogentilførselen til Oslofjorden". Dette ble gjennomført med bruk av fire metoder: Litteratursøk, befaringer, enkle pilotforsøk og forslag til design.

3. Metode

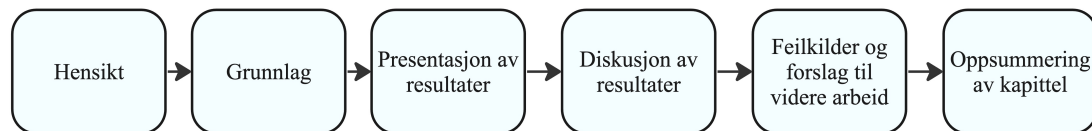


Figur 3.1: Figuren viser sammenhengen mellom de fire delene i metodekapittelet og resultatkapittelet og forskningsspørsmålene. Delkapittelene blir presentert i den representative rekkefølgen som figuren viser, med delkapittel 1 først og etterfulgt av delkapittel 2, 3 og 4.

Figur 3.1 beskriver metoden for studien. Hensikten med metodekapitlet er å vise fremgangsmåten for hvordan forskningsspørsmålene har blitt besvart:

1. Fordeler og ulemper med Anammox-prosessen basert på litteratursøk
2. Presentasjon av befaringer og erfaringer fra rensesanleggene i Oslo kommune og Rotterdam.
3. Resultater fra enkle pilotforsøk med Anammox-prosessen på fortynnet og kaldt avløpsvann
4. Resultat av et forslag til implementering av Anammox-prosessen på hovedstrømmen

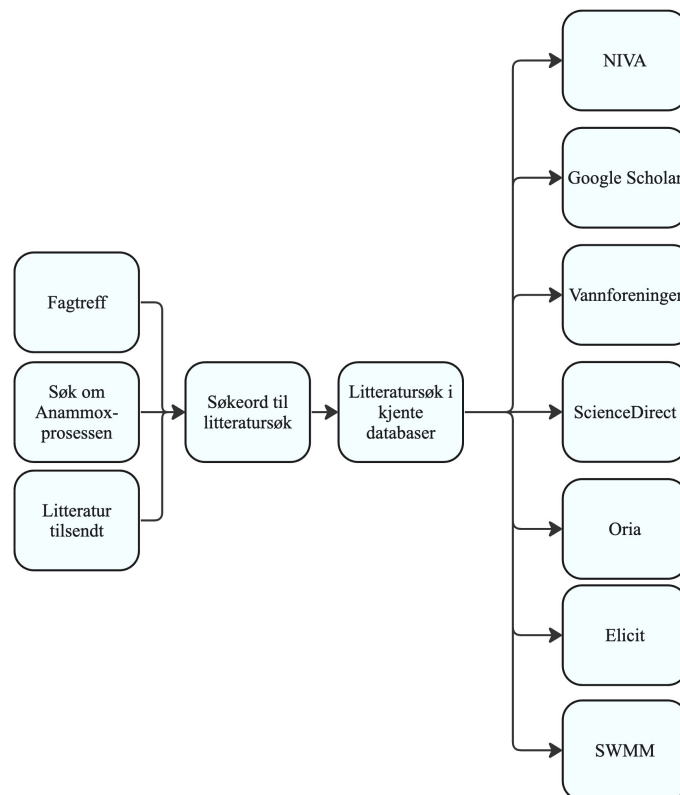
Figur 3.2 viser arbeidsmetoden for å besvare problemstillingen og forskningsspørsmålene. Noen sentrale diskusjoner blir presentert i resultatkapitlet. I vurderingskapittel, Kapittel 7, blir forskningsspørsmålene og resultatene vurdert og sett i sammenheng med problemstillingen.



Figur 3.2: Forklarer prosessen for hvordan resultatkapitlet er strukturert.

3.1 Del 1: Litteraturstudie

3.1.1 Metode



Figur 3.3: Litteratursøk

Det har blitt gjennomført litteratursøk i ulike databaser. En oversikt over prosessen er vist i Figur 3.3. Data er innhentet fra forskningsmiljøer som har jobbet med Anammox-prosessen, i blant annet Nederland og i Sverige. Fagpersonell i vann- og avløpsbransjen og har også gitt innspill til prosessen, gjennom et fagtreff som ble arrangert av Norsk Vann i mars 2023. Databasene som har blitt benyttet i litteratursøket er blant annet Elicit, Oria, ScienceDirect, Vannforeningen, Norsk Vann, SSWM, PubMed, Google Scholar. Nasjonale og internasjonale databaser har blitt benyttet for å finne relevant forskning for problemstillingen.

3.1.2 Vurdering av metoden

Forskningen på Anammox-prosessen er under utvikling og av den grunn kan det være litteratur som ikke er fanget opp i forbindelse med litteratursøket. Fokuset ved litteraturstudien har vært å finne informasjon om Anammox-prosessen i hovedstrømmen, teknologier, pilotanlegg og forskningsområder.

Nitrogenfjerning er også en omfattende problemstilling og det er mye kunnskap på området og det er en problemstilling det forskes mye på i dag både internasjonalt og i Norge. Vurderinger er blitt gjort ut ifra litteratursøk om hva som er relevant for å svare på forskningsspørsmålene. Begrensninger er knyttet til søk i databaser. Fokuset har vært å se på Anammox-prosessen på hovedstrømmen, med temaer som tar for seg forbehandling, temperatur, belastning på anlegg, renseeffekter, design og videre forskning. Det er kun søkt i åpne kilder uten betalingsmur.

3.2 Del 2: Befaringer

Totalt ble det gjennomført to befaringer under masterarbeidet:

1. Bekkelaget renseanlegg i januar 2023
2. Dokhaven WWTP / Slujesjesjik i mars 2023

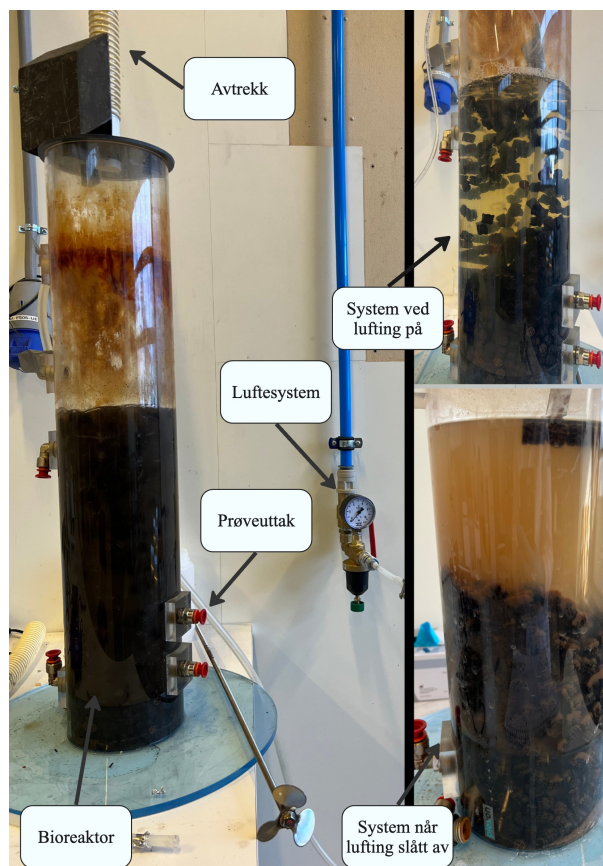
Nordre Follo renseanlegg og Bekkelaget renseanlegg ble kontaktet i forbindelse med å svare på spørsmålene om erfaringer med Anammox-prosessen de har på rejektivannet. Det ble gjennomført erfaringsutveksling med begge anleggene og tilsendt driftsdata fra Anammox-reaktorene.

I forbindelse med oppsett av pilotforsøket med bioreaktor ble det i januar gjennomført en befaringsreise til renseanlegget i Oslo (Bekkelaget renseanlegg). Her ble det blant annet hentet biomasse fra DeAmmon-reaktoren på sidestrømmen fra Bekkelaget renseanlegg. I mars ble det gjennomført en befaringsreise på renseanlegget Dokhaven WWTP og tilhørende slambehandlingsanlegg. Formålet med befaringsreisen var å få mer informasjon om studien som ble gjennomført, og hvordan vi kan implementere Anammox-prosessen på hovedstrømmen.

3.3 Del 3: Pilotforsøk

Formålet med forsøket er å gi en forståelse på hvordan det kan være mulig å implementere et pilotforsøk med Anammox-prosessen på et renseanlegg. Beskrivelse av fremgangsmåte, metode og resultater fremgår under.

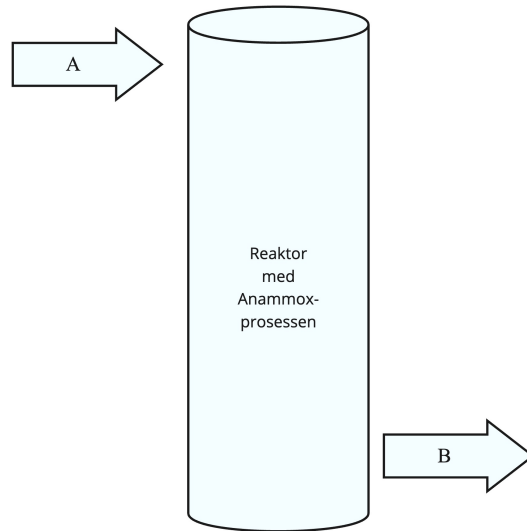
3.3.1 Forsøksoppsett



Figur 3.4: Bilder av forsøksoppsettet. Utaket for prøvetakingen er den øverste rød på høyre side. Figuren viser de sentrale delene av forsøket. Foto: Charlotte Marie Trovaag (mellom tidsperioden januar-april 2023)

I januar 2023 ble det satt opp et pilotanlegg, med en bioreaktor fra firmaet Biowater Technology, som rommer 10 liter. Pilotanlegget ble etablert på et laboratorium tilknyttet NMBU. Biomassen ble hentet fra DeAmmon-anlegget på Bekkelaget renseanlegg (BRA), den 19. januar 2023. Det ble tilsatt omtrent fem liter med biomasse fra reaktoren på BRA og omtrent en liter med drikkevann fra springen. Det ble i starten benyttet en blåsemaskin, men etter omtrent tre uker ble det koblet til et sentralt luftsystem, for å sikre kontinuerlig drift av pilotanlegget. Det ble ikke benyttet en omrører basert på at reaktoren måtte være koblet til et avtrekkskap. Luften ble slått av i periodevis, ved å bruke den røde spaken, som man kan se i Figur 3.4.

Forsøket ble gjennomført som et batch-forsøk, det vil si at det ikke er en kontinuerlig strøm av vann gjennom, men at det blir tilsatt og tatt en mengde ut periodevis. Figur 3.5 illustrerer oppsettet av et batch-forsøk. Hvor A er mengden man tilsetter og B er mengden man tar ut. Dette fører til at det var nødvendig å tilsette næring periodevis. Det ble tilsatt ammoniumklorid og natriumbikarbonat underveis i forsøket. Det ble tilsatt omtrent 1 gram med natriumbikarbonat og det varierte i mengden ammoniumklorid som ble tilsatt (se Vedlegg A for nøyaktig tilsetning). (Smith mfl., 2013).

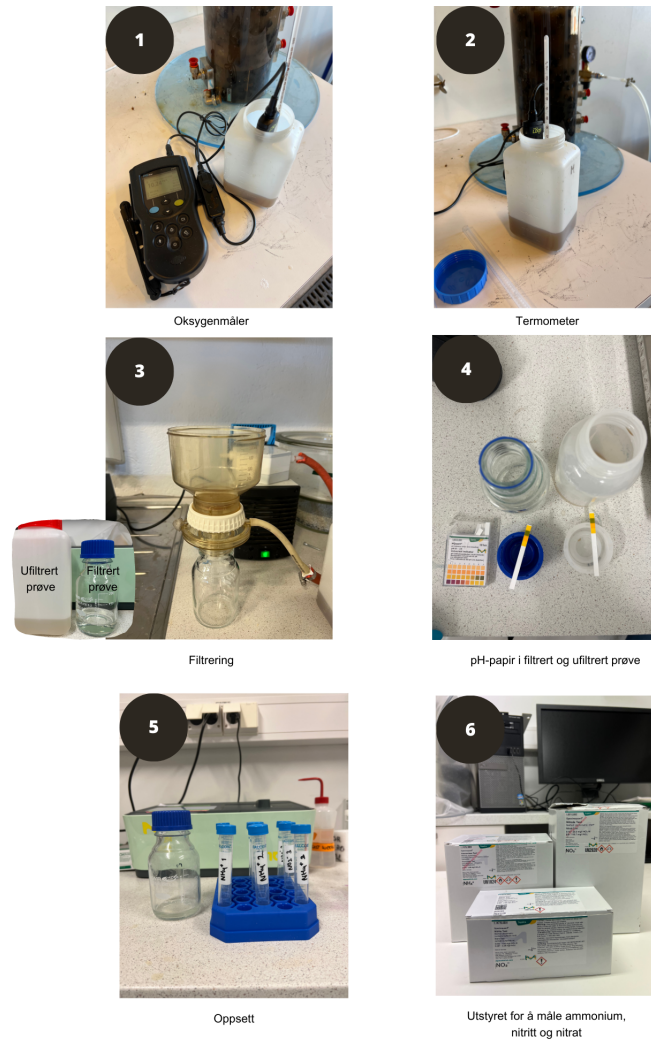


Figur 3.5: Illustrasjon av et batch-forsøk. Inspirasjon hentet fra (Smith mfl., 2013).

3.3.2 Metode

Ved prøvetaking ble det tatt ut omtrent 100 milliliter med prøve fra reaktoren for hver analyse. Det ble sett på oksygen-, temperatur og pH-verdier. Deretter ble det gjennomført prøver for ammonium, nitritt og nitrat i den representative rekkefølgen. Fremgangsmåten kan man se i Figur 3.6, som viser de seks hovedstegene av metoden for laboratorieforsøket. Uttaket for prøvene kan man se i Figur 3.4, som er den øverste røde ventilen på høyre side av reaktoren, hvor det ble tatt ut prøver som ble analysert. For å kvalitetssikre resultatene ble det gjennomført tre analyser av prøvene som ble tatt ut, for å minimere usikkerheten.

Utstyret som ble benyttet i forsøket kan man se i Figur 3.6: en oksygenmåler fra Hack, et termometer, filtreringsutstyr (1.2 mikrometer), pH-papir, testutstyret for måling av ammonium, nitritt og nitrat. Analysemetoden for ammonium, nitritt og nitrat er vedlagt, i Vedlegg B.



Figur 3.6: Fremgangsmåte for prøveuttak fra pilotforsøket.

3.3.3 Fremstilling og analyse av data

Under gjennomføringen av forsøket ble det hentet ut en prøve i en beholder. Videre ble det gjennomført tre paralleler hvor ammonium, nitritt og nitrat ble målt. I noen tilfeller ble det analysert to prøver, og det ble benyttet et gjennomsnittsverdi. Resultatene som har blitt benyttet til fremstillingen er temperatur, oksygennivået, pH-verdien, ammonium-, nitritt-, og nitratnivået ($NH_4 - N$, $NO_2 - N$ og $NO_3 - N$). For fremstilling av dataene fra forsøkene er det blitt benyttet programvaren Microsoft Excel og Python, for å plote resultatene. I Python har bibliotekene "pandas-" og "matplotlib-" bibliotekene blitt benyttet. Resultatene blir presentert i kapittel 5 og i Vedlegg A.

3.3.4 Vurdering av metode

Å gjennomføre et pilotforsøk kan være med på å øke forståelsen av Anammox-prosessen, men det kan være utfordrende å drifte anlegget og sikre gode analyser. Forsøksoppsettet er begrensende og et forslag til et mer optimalt oppsett er presentert i resultatkapitlet. Pilotforsøk er optimalt å inkludere i studien, basert på læringskurven det gir. Forsøksoppsettet har forbedringspotensialer, og det blir diskutert i resultatkapitlet.

3.4 Del 4: Forslag til design og anlegg

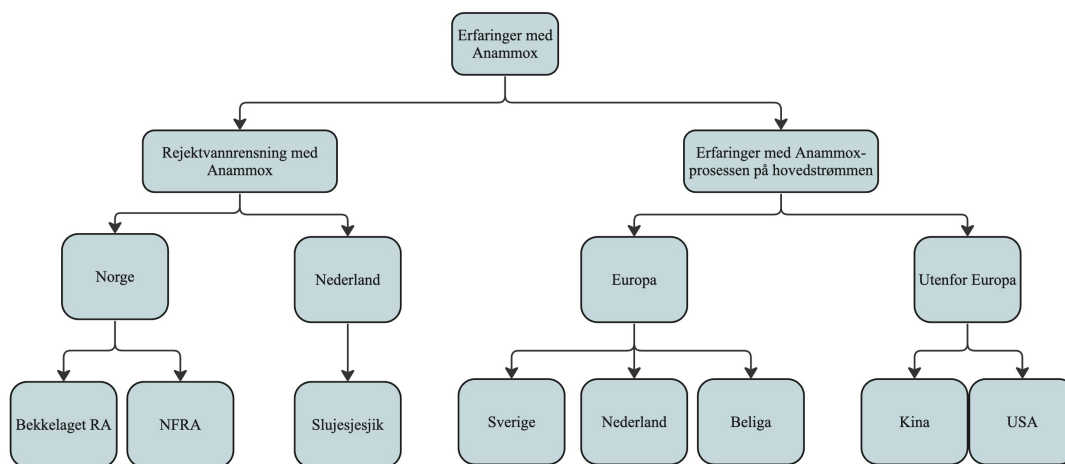
Formålet med designkapitlet er å komme med et forslag til hvordan man kan bygge ut et anlegg med Anammox-prosessen på hovedstrømmen. Det faglige design- og dimensjoneringsgrunnlaget er begrensende for Anammox og forslaget er foreslått med utgangspunkt i tidligere erfaringer. Først er det en gjennomgang av renseanlegget på Nordre Follo renseanlegg (NFRA), som det har blitt tatt utgangspunkt i. Forslaget til designet er tegnet inn i et forenklet flytskjema. Det er en presentasjon av to ulike designforslag.

4. Resultat: Erfaringer med Anammox-prosessen

I kapittel 4 presenteres erfaringer som har blitt sett på i litteraturstudiet. Denne delen retter seg i hovedsak til det første forskningsspørsmålet:

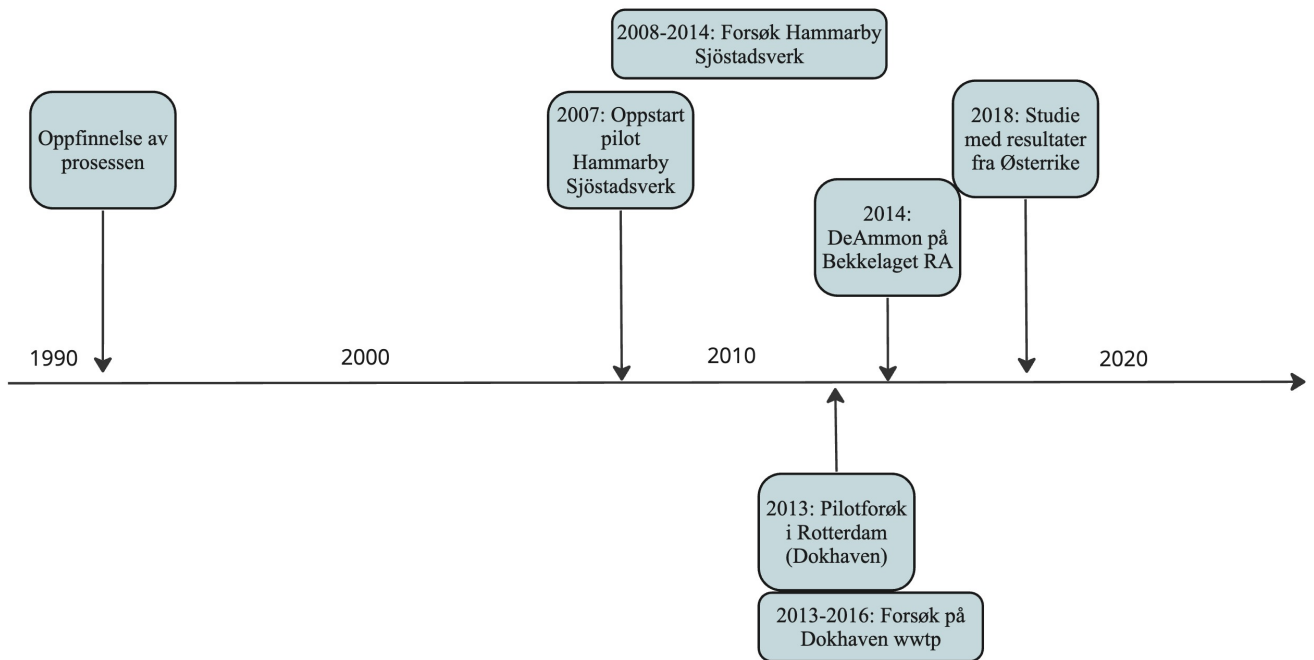
”Basert på eksisterende kunnskap, hvilke erfaringer ligger til grunn for implementering av Anammox-prosessen i Norge?”

Figur 4.1 viser en oversikt over litteratur som har blitt på sett på i litteraturstudiet. Det er både litteratur fra rejektivannrensning med Anammox og erfaringer fra forskning på hovedstrøm, både i og utenfor Europa:



Figur 4.1: Oversikt over erfaringer hvor det har blitt sett på Anammox.

Figur 4.2 viser en tidslinje for utvalgt forskning på Anammox:



Figur 4.2: Oversikt over hendelser knyttet til forskningen på Anammox. Kilder til datoene fremlegger under avsnittet hvor det er omtalt.

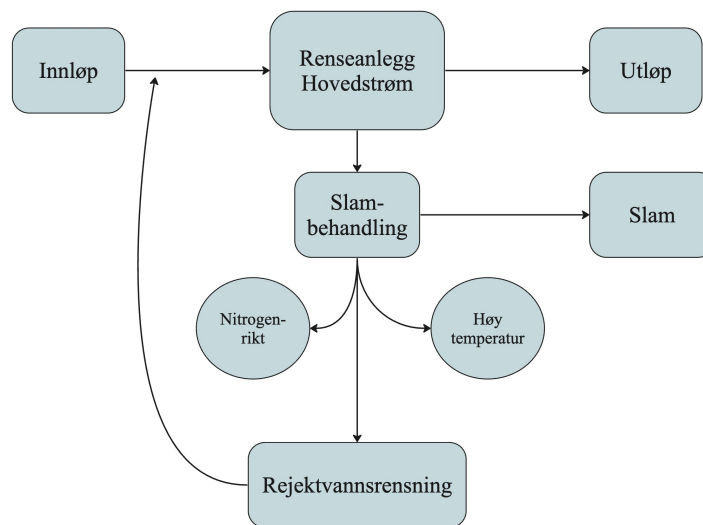
En artikkel som ble utgitt i 2019 av WRF (The Water Research Foundation) beskriver deammonifiseringsprosessen (delvis nitrifikasjon og Anammox). Artikkelen fokuserte på om Anammox-prosessen kan være egnet for bruk på hovedstrømmen. En av studiene som ble omtalt i artikkelen ble gjennomført på et rensanlegg i Østerrike. Her ble det sett på å benytte Anammox på hovedstrøm, kombinert med Anammox på sidestrømmen, hvor det er en strømning med Anammox-bakterier fra anlegget på sidestrømmen til anlegget på hovedstrømmen. (WRF (The Water Research Foundation)., 2019).

Forsøkene som ble gjennomført i Østerrike, viste effekt ved temperaturer på omtrent 11°C. Ved en mulig implementering av Anammox på hovedstrømmen, ble det i artikkelen anbefalt å se på fleksible kombinasjonsløsninger, i tillegg til at det er viktig med prosesskontroll av pH- og oksygenverdier. Artikkelen presenterte også ulempen med oppkonsentrasjon av NOB (nirittoksiderende bakterier). (WRF (The Water Research Foundation)., 2019) .

Anammox-prosessen kan primært skilles i tre ulike biologiske renseprosesser: biofilm-, aktivslam eller granulært slam-prosess. I følge en artikkel fra Vannforeningen, fra 2014, var SHARON-Anammox, Anita-MOX og DeAmmon de vanligste teknologiene for Anammox. DeAmmon baserer seg på SBR (Sequencing batch reactor), noe som inkluderer avluftingsperioder. Både DeAmmon og Anita-MOX baserer seg på biofilm-prosesser. (Szatkowska og Paulsrud, 2014).

4.1 Rejektivannrensing med Anammox-prosessen

Anammox-prosessen er mest kjent i Norge som en del av rejektivannrensingen på renselanlegg. Her er temperaturen som regel mellom 30-35°C. Observasjoner og erfaringer har vist at vekstforholdene for Anammox-prosessen er gunstige under disse forholdene. (Tchobanoglous mfl., 2014).



Figur 4.3: Figuren viser en forenklet forklaring på rejektivannrensing

Nordre Follo renselanlegg (NFRA) og Bekkelaget renselanlegg (BRA) er to renselanlegg i Norge som har slambehandling med en tilhørende Anammox-reaktor. Figur 4.3 viser en forenkelt skisse over hvordan rejektivannrensing kan bli prosjektert på et renselanlegg. I hovedstrømmen på et renselanlegg blir det produsert slam, som må stabiliseres og hygeniseres, før det kan bli benyttet til for eksempel som gjødsel til landbruket. Rejektivann fra slambehandlingen inneholder høye nitrogenkonsentrasjoner og høye temperaturer. (Statsforvalteren i Innlandet, 2022).

4.1.1 Erfaringer fra Norge

Bekkelaget renseanlegg (BRA)

I januar ble gjennomført en befaring til Bekkelaget renseanlegg (BRA). Formålet med befaringen var å hente biomasse til pilotforsøket og se på Anammox-prosessen DeAmmon. DeAmmon ble installert i 2014, og etter installasjonen opplevde BRA at det var med på å øke den totale renseseffekten for nitrogen. Reaktoren har et volum på 550 kubikk og baserer seg på biofilmteknologien, i tillegg til å ha en periodisk lufting (med sykluser på 180 minutter). Prosesstemperaturen varierer mellom 29-37°C. Under befaringen ble det observert en oksygenkonsentrasjon på 0.86 milligram per liter. (Tsui, 2023; Angeltvedt mfl., 2022)



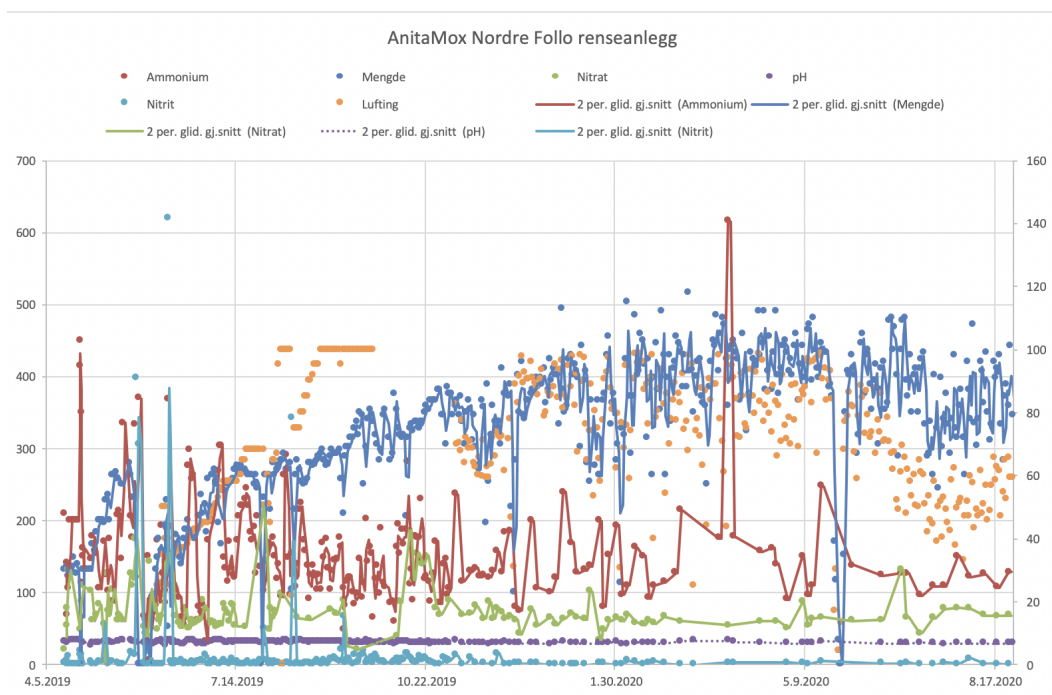
Figur 4.4: Bilder fra befaring på Bekkelaget renseanlegg. Bildene viser DeAmmon. Fotograf Charlotte Marie Trovaag, 190123.

Imidlertid, har BRA opplevd problemer med DeAmmon. Sommeren 2020 ble det observert at over over 90% av Anammox-bakteriene forsvant, og ikke før i april 2021 fungerte anlegget som det skulle igjen. Den mulige årsaken til problemet, som ble diskutert, var at det ble installert en ekstra råtnetank våren 2020 som førte til høyere ammoniumkon-

sentrasjoner til reaktoren, og på bakgrunn av at ammoniakk og ammonium er i likevekt, ble det høyere konsentrasjoner av ammoniakk. Ammoniakk kan være giftig for prosessen. Et tiltak som ble innført var å øke luftingen, og observasjonene viste at det ble en akkumulering i nitritt, noe som tydet på at en treg start igjen for Anammox-bakterien, i motsetningen til AOB-bakteriene (ammoniumoksidierende bakterier). (Angeltvedt mfl., 2022).

Nordre Follo renseanlegg (NFRA)

Nordre Follo renseanlegg (NFRA) har Anammox-prosessen, AnitaMox, for å rense rejektivannet fra avvanningsmaskinene. Temperaturen i reaktoren er på omtrent 30°C, og det er en forholdsvis lang oppholdstid i reaktoren. Driftspersonell fra NFRA nevner at det er flere fordeler med Anammox-prosessen, som blant annet muligheten for å rense høy konsentrasjon av nitrogen, og sammenlignet med MBBR-systemet på hovedstrømmen, er prosessen både energi- og arealbesparende. Oksygentilførselen til AnitaMox er på omtrent 0.30 - 0.70 milligram per liter. Det gjør at det er enkelt å håndtere luften i et luktfjerningsanlegg. NFRA opplevde renseresultater for nitrogen på 81% i 2022. AnitaMox gir et effektivt bidrag for økt nitrogenfjerning på NFRA. (Driftspersonell på Nordre Follo renseanlegg (NFRA), 2023)



Figur 4.5: Figur tilsendt fra kontaktperson i NFRA. pH-verdien har vært på omtrent 8 i reaktoren. Hentet fra driftsjournalen til AnitaMox på NFRA(Driftspersonell på Nordre Follo renseanlegg (NFRA), 2023).

Figur 4.5 viser resultatene fra analysene for AnitaMox-reaktoren på NFRA i perioden april 2019 til august 2020. Figuren viser oversikt over hvordan konsentrasjonen av vannmengde, ammonium, nitritt, nitrat, lufting og pH varierer over perioden. Figuren illustrerer en viss sammenheng mellom lufting og belastning. Ved lave ammoniumkonsentrasjoner og mye lufting, kan det muligens være utfordrende å drifte og sikre gode vekstforhold for Anammox. I periodene hvor det er mer lufting, kan man se tendenser til at nitritt og nitrat øker. Samtidig som når det er mindre lufting, vil konsentrasjonen av ammonium øke. (Driftspersonell på Nordre Follo rensesanlegg (NFRA), 2023).

4.1.2 Slujesjesjik slambehandlingsanlegg i Rotterdam (Nederland)

Dokhaven rensesanlegg, i Rotterdam (Nederland), har også tilhørende slambehandlingsprosess med Anammox-prosessen på rejektvannet. Reaktoren er vist i Figur 4.6, hvor man kan se utformingen av Anammox-reaktoren. Her har de gjennomført forskning på bruk av Anammox på hovedstrøm, noe som omtales i neste kapittel.



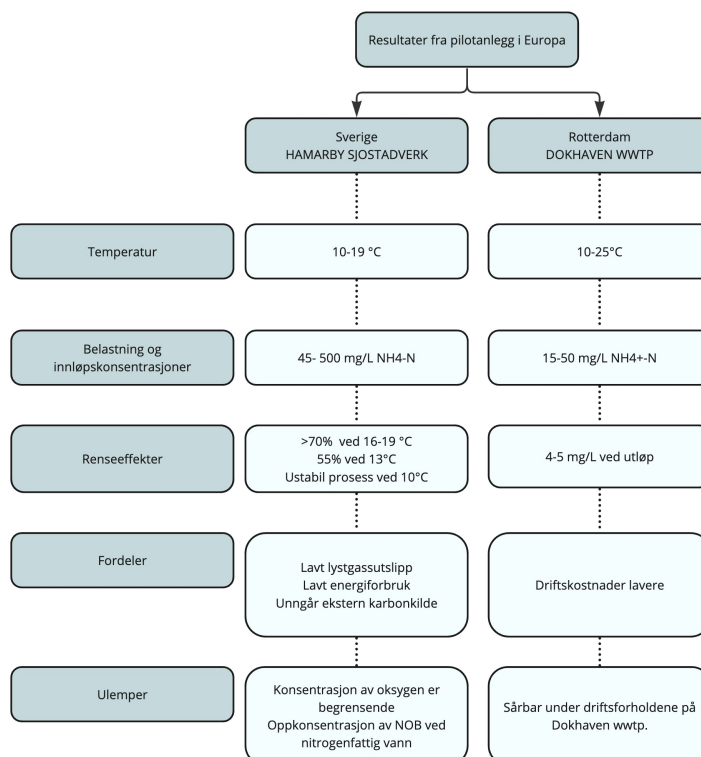
Figur 4.6: Anammox-reaktor på Slujesjesjik slambehandlingsanlegg i Rotterdam. Fotograf: Charlotte Marie Trovaag, 14.03.23.

4.2 Bruk av Anammox-prosessen på hovedstrøm

I 2014 ble det utgitt en artikkel fra Vannforeningen som presenterte fordeler og ulemper med bruk av Anammox-prosessen. Artikkelen nevner at Anammox-prosessen på hovedstrømmen kan være et alternativ til bærekraftig avløpsrensing, ved at det er en energibesparende renseprosess og at det ikke er nødvendig å tilsette en ekstern karbonkilde. Det forskes på bruk av Anammox på kaldere vann over store deler av verden. Det er utført studier i Europa, i tillegg til blant annet i Kina og USA. Her er det både gjort forsøk med å benytte Anammox-prosessen som aktivslam- og biofilm-prosess. (Szatkowska og Paulsrud, 2014).

4.2.1 Internasjonale erfaringer

I Sverige (Hammarby Sjøstadsverk) og Nederland (Dokhaven WWTP) har det blitt gjennomført forskning på å benytte Anammox-prosessen på kaldere vann, og Figur 4.7 viser en oppsummering av noen av funnene fra studiene. Figuren viser en oversikt over relevant data fra et utvalg av studier som har blitt gjennomført ved renseanleggene. Her er det fokusert på parameterene: temperatur, belastning og innløpskonsentrasjoner, renses effekter, fordeler og ulemper.



Figur 4.7: Viser en oppsummering og sammenligning av noen av funnene fra studiene ved Hammarby Sjøstadsverk og Dokhaven WWTP. (Trela mfl., 2014; Hendrickx mfl., 2017).

Hammarby Sjöstadverk

Ved Hammarby Sjöstadverk i Sverige har det blitt gjennomført forskning på Anammox-prosessen over flere år. En rapport som ble utgitt i 2014 av det svenske forskningscenteret Swedish Environmental Research Institute (IVL) presenterte en gjennomgang på forskningen på Anammox-prosessen. Forskningen på Anammox-prosessen startet på slutten av 1990-tallet og i 2007 ble det satt opp et full-skala-test-anlegg. Forsøkene varte fra 2008 til 2014. Konklusjonen fra rapporten viser at det er nødvendig med mer forskning på å redusere nitratakkumulering. (Trela mfl., 2014)

Rapporten har sammenlignet Anammox-prosessen med nitrogenfjerning med denitrifikasjon. Funnene presenteres Figur 4.8. Figuren viser at energiproduksjonen, karbondioksid utslippet og lystgassutslippet er lavere for Anammox-prosessen. I rapporten ble det presentert at fordelen med Anammox er at det ikke er nødvendig med en ekstern karbonkilde. Funnene indikerte på at det var flere miljømessige fordeler med prosessen. (Trela mfl., 2014)

Prosess	Nitrifikasjon/ denitrifikasjon	Anammox (delvis nitrifikasjon + anammox)
Energi kWh/kg N	1.3	0.5
Ekstern karbonkilde kg/kg N	2.3	0
Karbondioksid utslipp tonn/tonn N	3.5	0.4
Lystgassutslipp	Høy	Lav

Figur 4.8: Sammenlikning av tradisjonell nitrifikasjon/denitrifikasjon og Anammox i forhold til bærekraftige valg. Hentet direkte og skrevet av fra rapporten fra Hammarby Sjöstadverk (Trela mfl., 2014).

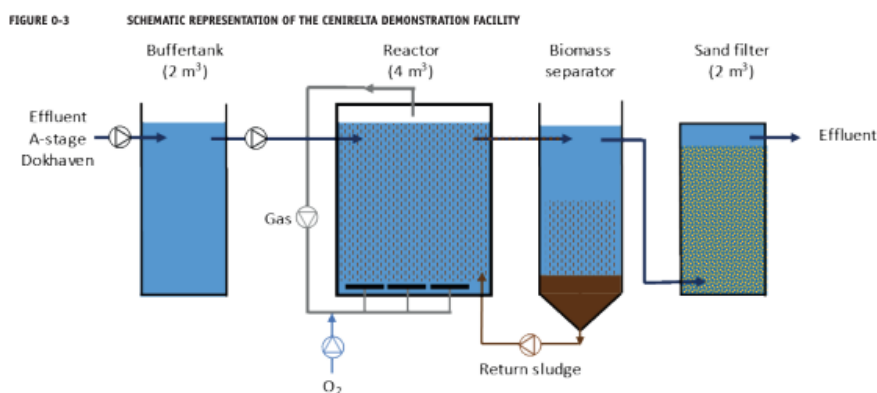
Konklusjonen fra rapporten presenterte at lav temperatur har en effekt for renseeffekten. Studien som ble gjennomført studerte temperatursenkingen fra 19 til 10°C, og deretter fortynnet ammoniumkonsentrasjon (fra 500 mg/L til 45 mg/L). De overordnede resultatene viste at nitrogenfjerningen var på over 70% ved temperaturer mellom 16°C og 19°C, men den ble redusert til 55% ved 13°C og ved 10°C var prosessen ustabil og separasjonshastigheten var lav. (Trela mfl., 2014)

Forskningen ved Hammarby Sjøstadsverk studerte den mikrobielle sammensetningen. Resultater fra studien viste at NOB-aktiviteten (Nitrittoksiderende bakterier) ikke ble endret ved temperatursenking. I studien ble det også påvist aktivitet av Anammox-bakteriene ved 5°C. Det ble nevnt at for å løse problemet med oppkonsentrasjon av NOB i Anammox, kan være å ha stabil styringsprosess med kontroll på pH- og oksygenivået. Siden innløpskonsentrasjonen av ammonium var lav, ble det foreslått å benytte biofilmer. En annen løsning som ble foreslått var å øke temperaturen på vannet, men dette vurderes som en kostbar løsning. (Trela mfl., 2014)

Dokhaven WWTP i Rotterdam

Forskningsprosjektet CENIRELTA (Cost Effective Nitrogen Removal from wastewater with Low Temperature Anammox) ble gjennomført ved renseanlegget i Rotterdam (Dokhaven WWTP) fra 2013 til 2016. Hensikten med prosjektet var å forske mer på resultater fra et pilotforsøk som ble gjennomført ved Dokhaven WWTP i 2012. Beslutningsstøtten for gjennomførelse av CENIRELTA-prosjektet var at erfaringer fra pilotforsøket viste at det var mulig å få til nitrogenfjerning ved nitrogenfattig vann og ved lavere temperaturer. Målet med CENIRELTA-prosjektet var å få et mer omfattende erfaringsgrunnlag for å benytte Anammox-prosessen på hovedstrømmen. (Hendrickx mfl., 2017).

CENIRELTA-prosjektet så på hvordan man kan implementere Anammox-prosessen på hovedstrømmen på Dokhaven WWTP med kapasitet på cirka 560 000 personekvivalenter (pe). Dokhaven WWTP er under bakken og går over to etasjer. Det kan derfor være utfordrende med implementering av ulike teknologier som kan føre til blant annet høye kostnader og energiforbruk. Som det nevnes i rapporten, vil derfor Anammox-prosessen kunne være et bærekraftig alternativ på hovedstrømmen, basert på blant annet behovet for mindre lufting. (Hendrickx mfl., 2017).



Figur 4.9: Oppsett av forsøksdesign under pilotforsøk i Rotterdam. (Hendrickx mfl., 2017)

CENIRELTA-prosjektet så på Anammox-anlegg med granulær biomasse. Biomassen besto av både Anammox-bakteriene og AOB, hvor AOB-bakteriene ligger som et lag rundt bakteriene. Figur 4.9 viser forsøksoppsettet. Prosessen baserte seg på at rejektivannet fra slambehandlingen ble sendt tilbake til Anammox-prosessen, for kontinuerlig tilførsel av Anammox-bakteriene. (Hendrickx mfl., 2017; Geilvoet, 2023).

Renseresultatene over perioden er vist i Figur 4.10. Erfaringene fra forskningsprosjektet var at Anammox-prosessen på hovedstrømmen kan være mulig å få til, men det er fortsatt utfordringer for å få dette til. Noen av utfordringene som ble presentert i rapporten var å redusere vekst av NOB og samtidig sikre gode vekstvilkår for AOB og Anammox-bakteriene. NOB kan virke konkurrerende ovenfor de andre bakteriene. Resultatene viser at nitrogenfjerning kan oppnås både ved sommer- og vintertemperaturer. Imidlertid, kan resultatene tyde på at renseeffektiviteten til Anammox har sesongvariasjoner. Om sommeren når temperaturen er som regel over 17°C, viser forskningen at det var mulig å oppnå et renseresultat på 10 milligram per liter. Samtidig som det var mer utfordrende å oppnå dette om vinteren, som ble forklart med blant annet for kort oppholdstid og lavere innløpskonsentrasjoner av nitrogen. (Hendrickx mfl., 2017; Geilvoet, 2023)

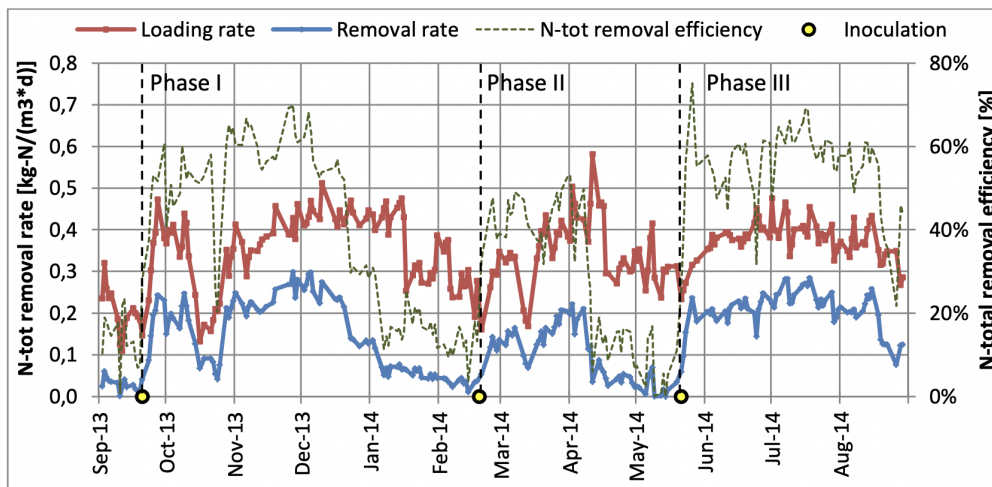


Figure 1.3 Nitrogen volumetric loading and removal rate, removal efficiency

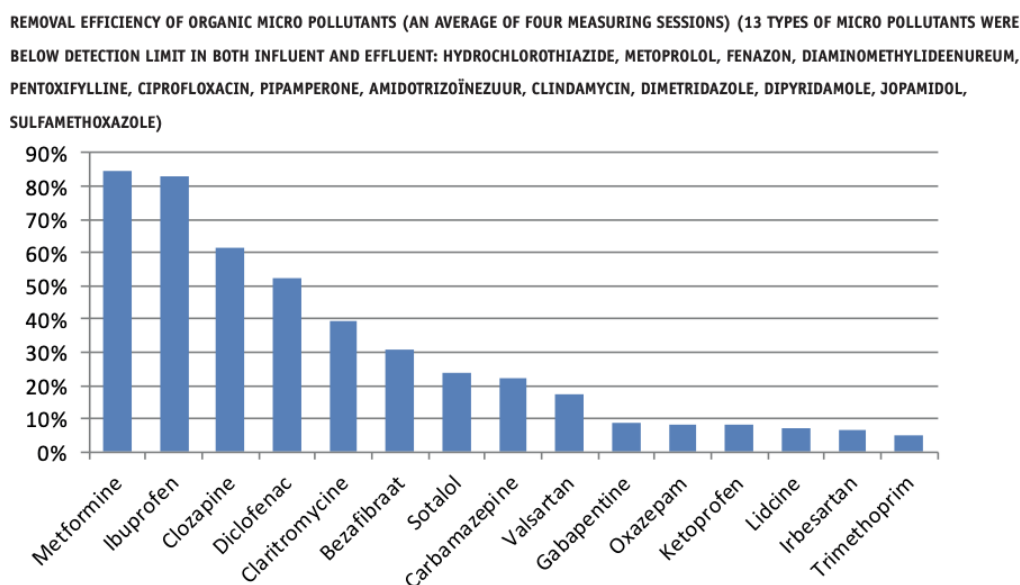
Figur 4.10: Renseresultatene over perioden. Hentet fra (Geilvoet, 2023; Hendrickx mfl., 2017).

Forskningsprosjektet viste over perioden at det var utfordrende å drifte Anammox-prosessen på hovedstrømmen. Dette er basert på blant annet vekst av hetrotrof biomasse og forstyrrelser i det første steget (A) som ga en negativ effekt for neste steg (B). Det er flere utfordringer med implementering av Anammox-prosessen på hovedstrømmen. I forskningsprosjektet ble det erfart at uønsket nitratdannelse hadde en sammenheng med oksygenkonsentrasjonen. Temperaturen hadde ikke like stor påvirkning, i følge forskningen gjennomført i CENIRELTA-prosjektet. Det ble observert en oppkonsentrasjon av

nitrat under nedbørhendelser og andre faktorer som påvirker belastningen til reaktoren med Anammox-bakteriene, som blant annet ble det erfart høyere konsentrasjon av organisk materiale. Det ble en lavere omdanning av ammonium til nitritt, som kan forklares ved at de hetrotrofe bakteriene forbruker oksygen. (Hendrickx mfl., 2017).

Det ble foreslått og sett på en løsning hvor man benytter sandfilter i etterkant. Resultatene ga en nitrogenkonsentrasjon i utløpet på 4-5 milligram per liter. Nitratet som eventuelt blir dannet i prosessen kan dermed fjernes i et sandfilter. Det er forventet lavere driftskostnader med bruk av Anammox-prosessen, i følge rapporten fra CENIRELTA-prosjektet. Prosessen viser at det er egnet for å oppnå en utløpskonsentrasjonen av nitrogen på 10 milligram per liter. CENIRELTA-prosjektet foreslår at videre studier bør fokusere på å sikre god forbehandling og konklusjonen fra prosjektet viste at det var lettere å implementere Anammox under mer konstant vannføring og høyere temperaturer. (Hendrickx mfl., 2017).

Et annen interessant funn som ble diskutert i CENIRELTA var fjerning av mikroforurensningene og det ble analysert for 28 typer hormoner og legemidler gjennom fire analyser. 12 av 28 mikroforurensninger var under kravet, men renseseffekten varierte mellom 5-85%, som vist i figur 4.11. (Hendrickx mfl., 2017).



Figur 4.11: En annen interessant funn som ble diskutert i CENIRELTA prosjektet er fjerning av mikroforurensningene. Figuren viser et utvalg av mikroforurensningene. Det ble målt for 28 typer hormoner og legemidler gjennom fire analyser. 12 av 28 mikroforurensninger var under kravet. Hentet fra rapport, (Hendrickx mfl., 2017)

4.2.2 Anammox-prosessen sammenlignet med nitrifikasjon/ denitrifikasjon

Verdiene i Figur 4.12 viser forskjellen mellom nitrifikasjon/denitrifikasjon og Anammox-prosessen, med et tilhørende steg med nitrifikasjon. Figuren viser at det er lavere biomasseproduksjon og mindre nødvendig oksygentilførsel. Anammox-bakterier er autotrofe og mesteparten av biomassen som produseres i nitrifikasjon/denitrifikasjon er hetrotrof. (WRF (The Water Research Foundation)., 2019)

Parameter	Anammox (Deammonifisering)	Nitrifikasjon / 85% denitrifikasjon
Oksygen	1.84 g O ₂ / NH ₄ -N oksidert	3.42 g O ₂ / NH ₄ -N oksidert
Biomasseproduksjon	0.12 g Biomasse VSS/g NH ₄ -N fjernet	1.6 g Biomasse VSS/g NH ₄ -N fjernet

Figur 4.12: Viser en sammenligning mellom Anammox (med nitrifikasjon) og nitrifikasjon/denitrifikasjon. Resultater hentet og oversatt fra (WRF (The Water Research Foundation)., 2019).

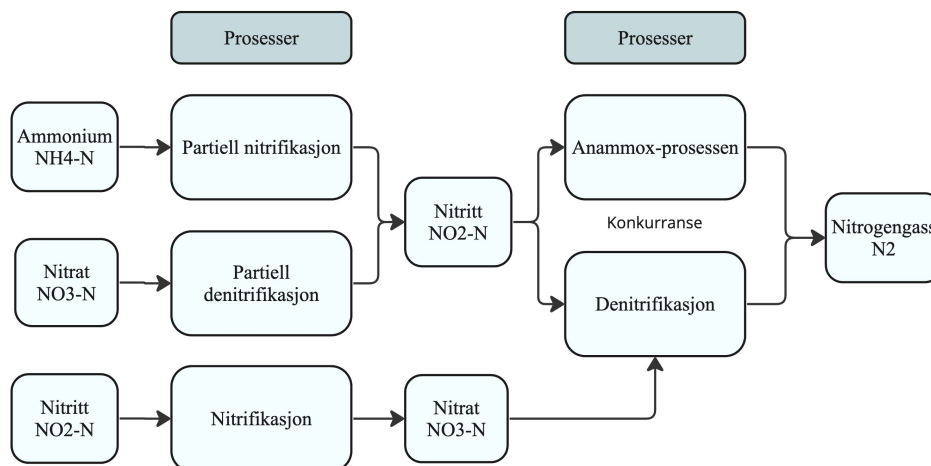
4.2.3 Erfaringer fra Beliga (Gent University)

Bruk av Anammox-prosessen på hovedstrømmen har blitt forsket på flere steder i Europa. I Belgia (Gent University) ble det sett på et anlegg med HRAS (high-rate activated sludge) etterfulgt av PNA (Partial-nitrification-anammox). Resultatene fra studien viste at det ble over 60% energibesparelse knyttet til lufting, sammenliknet med nitrogenfjerningsanlegg med denitrifikasjon. Denne artikkelen trekker også frem utfordringene med de saktevoksende Anammox-bakteriene og oppkonsentrasjon av hetrotrofe bakterier. (Jia mfl., 2019).

4.2.4 Oppstart av reaktorer med Anammox-prosessen

Forskning på Anammox-prosessen har også blitt gjennomført i Kina. En løsning som ble foreslått var: PANDA (Partial nitrification and partial denitrification combined Anammox), hvor denitrifiserende bakterier vil redusere nitrat til nitritt. Figur 4.13 viser en oversikt over forslaget, hvor man ser at ved partiell nitrifikasjon og partiell denitrifikasjon, vil det bli dannet nitritt, som er en forutsetning for at Anammox-prosessen. Derfor bør man se på muligheten for å tilrettelegge for disse prosessene i et anlegg med

Anammox. Et interessant funn fra studien er at vanntemperaturen påvirker den stabile driften av prosessen og lavere temperatur påvirker bakteriene i prosessen. (Zuo mfl., 2023).



Figur 4.13: Forklaring av "PANDA". Inspirasjon fra (Zuo mfl., 2023)

4.3 Erfaring med Anammox fra akvakultur

Anammox-prosessen kan være aktuell å benytte i andre renseprosesser enn for kommunalt avløpsvann. En masteroppgave fra NTNU så på bruk av Anammox-prosessen i forbindelse med biologiske renseprosesser for akvakulturanlegg. Studien så på PNA (Partial nitrification Anammox (norsk: delvis nitrifisering med Anammox)). Løsningen som ble sett på var om Anammox-prosessen kunne være et bidrag for nitrogenfjerning fra RAS (resirkulerte strømmer) på akvakulturanlegg. Studien så på om det var mulig å tilpasse prosessen til lavere konsentrasjoner. (Lea, 2022).

I studien ble det benyttet biofilmbærere fra NFRA (Nordre Follo renseanlegg). Studien som ble gjennomført bestod av to ti-liters-reaktorer, hvor temperaturen var litt over 10°C. Resultatene fra studien viste at det var mulig å oppnå 90% nitrogenfjerning. I studien ble det konkludert med at å eksponere biofilmbærere for lavere ammoniumkonsentrasjoner var vellykket. (Lea, 2022).

4.4 Oppsummering av kapittel

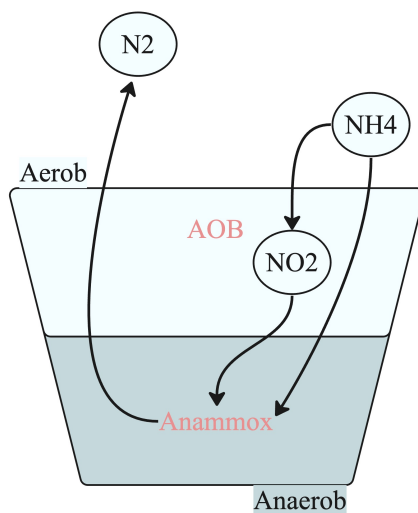
Flere studier og erfaringer viser at prosessen kan være et effektivt bidrag, men det gjenstår fortsatt forskning som må gjennomføres før man kan si noe om bruk av prosessen på hovedstrømmen. I neste kapittel blir resultater fra pilotforsøket med Anammox presentert.

5. Resultat: Pilotforsøk

Kapitlet tar for seg resultatene fra pilotforsøket, hvor datagrunnlaget er lagt ved i Vedlegg A. Denne delen retter seg i hovedsak til forskningsspørsmålet:

”Hvordan kan pilotforsøk bidra til å bekrefte om Anammox-prosessen kan være en effektiv metode for fjerning av nitrogen i fortynnet og kaldt avløpsvann?”

I pilotforsøket er det blitt benyttet et biomedie fra DeAmmon reaktoren på Bekkelaget rensesanlegg. Figur 5.1 illustrerer en forenklet forklaring av hvordan biomediet fungerer. Her blir ammonium og nitritt diffundert inn i biomediet og omdanner nitrogen til nitrogen-gass, ved bruk av ammoniumoksidierende bakterier (AOB) og Anammox-bakterier.



Figur 5.1: Forenklet illustrasjon av funksjon til et biomedie. Inspirasjon fra (WRF (The Water Research Foundation)., 2019)

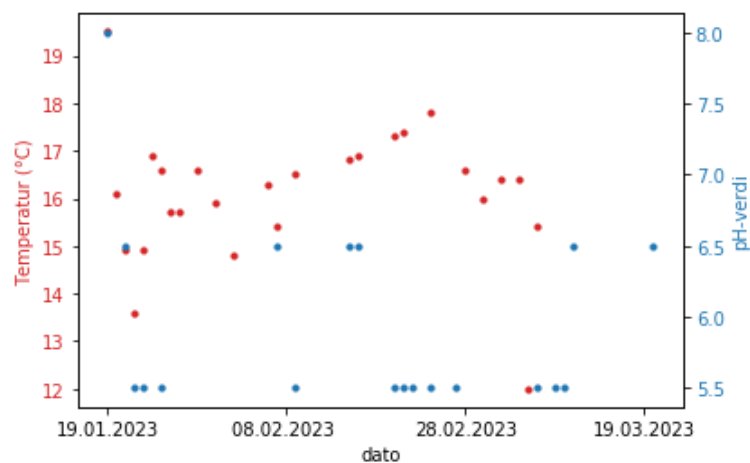
Figur 5.2 viser biomedie som ble benyttet i pilotforsøket. Anammox-bakteriene har en rød farge. (Tchobanoglous mfl., 2014).



Figur 5.2: Bildet tatt av reaktoren som ble benyttet til pilotforsøket. Fotograf: Charlotte Marie Trovaag.

5.1 Resultater fra pilotforsøk

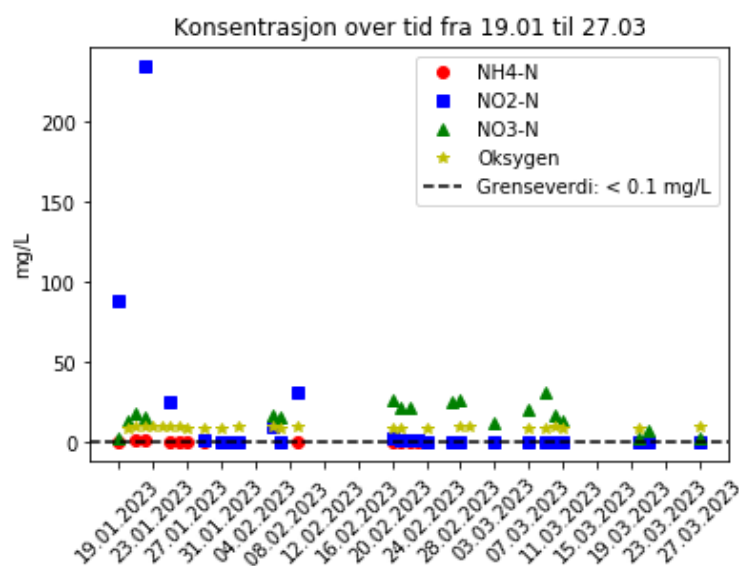
Temperatur og pH



Figur 5.3: Illustrerer variasjonen pH-verdien (rød) og temperatur (blå) over forsøksperioden.

Temperaturen varierte mellom 12-18°C. Figur 5.3 viser temperaturen høyere ved oppstart i januar, før temperaturen gikk gradvis nedover. Temperaturen økte litt fra februar til mars. I mars nådde temperaturen sitt laveste punkt (12°C.). Figur 5.3 viser også at pH-verdiene varierte mellom cirka 5.5 til 8.0. Verdiene ble målt med et pH-papir, og derfor er de ikke nøyaktige. I figuren kan man se at pH-verdien sank fra en pH-verdi på 8.0 til omtrent 5.5. Noe som tyder på at kan ha vært en lavere pH-verdi i reaktoren enn optimalt, men pH-papir er svært unøyaktig å benytte for å kvantifisere pH-verdi.

Forsøksperioden fra januar til april

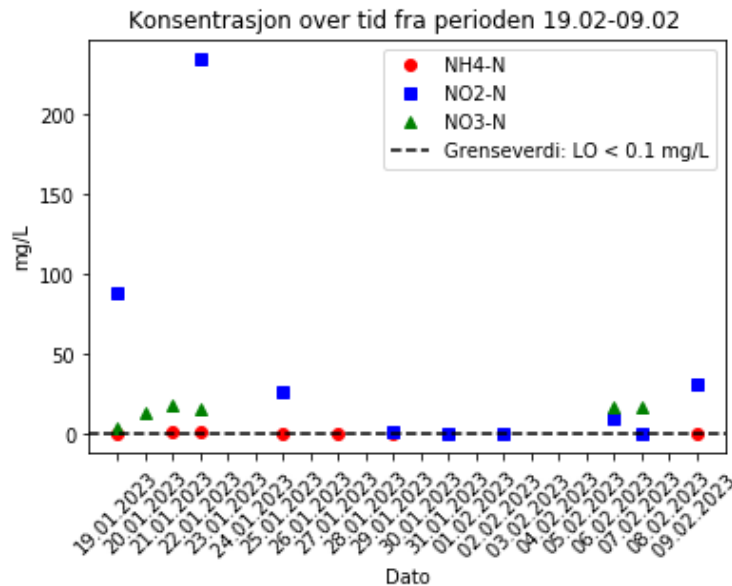


Figur 5.4: Figuren viser overordnede resultater fra testperioden 19.01.2023 til 27.03.2023. Resultatene viser at ammoniumkonsentrasjonen (NH_4-N) har vært lav over perioden, mens nitritnivået økte i starten, før det gradvis ble lavere. Nitratkonsentrasjonen (NO_3-N) har holdt seg relativt stabil, men har økt litt periodevis. Oksygenkonsentrasjonen har holdt seg relativt stabil over perioden, men noen små forandringer.

Figur 5.4 illustrerer en sammenligning av hvordan ammonium-, nitritt- og nitrat-nivåene var over forsøksperioden. På den horisontale aksene vises dato og på den vertikale aksene vises enhet (milligram per liter). Nivået for ammonium (NH_4-N) er under deteksjonsgrensen for måleutstyret (mindre enn 0.01 milligram per liter). Nitritkonsentrasjonen økte i starten av forsøksperioden, før konsentrasjonen ble redusert betraktelig. Nivået for nitrat var relativt stabilt over perioden og oksygenivået var relativt stabilt over perioden, med små variasjoner. Resultatene viste at oksygenivået er høyt og verdiene er målt under luftingsperiodene. Samtidig kan det være at Anammox-bakteriene har vært beskyttet, og operert under anaerobe forhold fortsatt. Variasjonen av nivå for ammonium, nitritt, nitrat er beskrevet i vedlegget (Vedlegg A), sammen med en beskrivelse av når ammoniumklorid og natriumbikarbonat ble tilsatt.

Videre blir resultater fra periodene: januar (periode 1), første del av februar (periode 2), andre del av februar (periode 3) og mars (periode 4) presentert:

Periode 1 - Januar



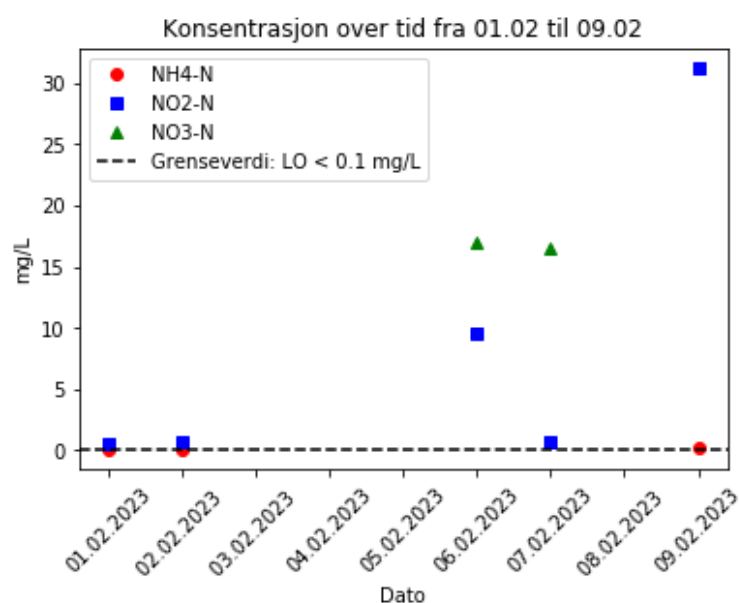
Figur 5.5: Periode 1: Resultater fra perioden 19.januar til 09. februar (oppstarts-fase). Det ble tilsatt ammoniumklorid den 24.01 (2.9 gram), 27.01 (3.2 gram), 31.01 (3.6 gram), 03.02 (5.5 gram) og 07.02 (6.1 gram).

Figur 5.5 viser resultater forsøksperiode 1 og illustrerer en sammenligning av verdiene fra 19. januar til 09. februar. Figuren viser at ammoniumkonsentrasjon har vært lav, til tross for at ble tilsatt ammoniumklorid jevnlig. Ved at ammoniumkonsentrasjonen har vært under grenseverdien for måleinstrumentet, altså mindre enn 0.01 milligram per liter, tyder det altså på at nitrogen har blitt fjernet i prosessen. Dette kan være med å sannsynliggjøre at Anammox-bakteriene har omdannet ammonium til nitritt eller direkte til nitrogen-gass. Nitrittkonsentrasjonen øker, som kan være et forventet resultat, ved at ammonium oksiderende bakterier (AOB) er ikke like saktevoksende som Anammox-bakteriene. Nitrittnivået ble etter hvert betraktelig lavere, som kan skyldes tilstedeværelse av nitrittoksiderende bakterier (NOB), som omgjør nitritt til nitrat. Samtidig viser ikke målingene tilstedeværelse av nitrat den 06.02, så dette kan ikke konkluderes.

I perioden mellom 23.01. til 07.02, var det ikke mulig å måle nitratnivået, basert på manglende reagenser på laboratoriet, noe som gjør at det kan være vanskelig å konkludere om det har vært en tilstedeværelse av NOB eller Anammox-bakterier. Nitritt-verdien var høy den 21.01., som kan også skyldes feilkilder i forsøket. Feilkildene blir diskutert samlet til slutt etter at resultatene fra pilotforsøket er presentert.

Periode 2 - Første del av februar

Resultatene fra første del av februar er vist i Figur 5.6. Det ble tilsatt ammoniumklorid den 03.02, og etter omtrent seks dager kan man se at nitratnivået er fortsatt forholdsvis lavt. Dette kan være med på å indikere at Anammox-bakteriene er tilstede i reaktoren, og har omdannet ammonium, ved bruk av nitritt som elektronakseptor, til nitrogengass. Nitritnivået øker igjen den 09.02. Her ble prøvene målt etter at det ble tilsatt omtrent 5.0 gram med ammoniumklorid. Luftingen ble slått av i omtrent ti minutter, før prøvene ble hentet ut. Dette kan illustrere at det er bakterier tilstede i reaktoren som omdanner ammonium til nitritt, og at denne prosessen er forholdsvis rask.

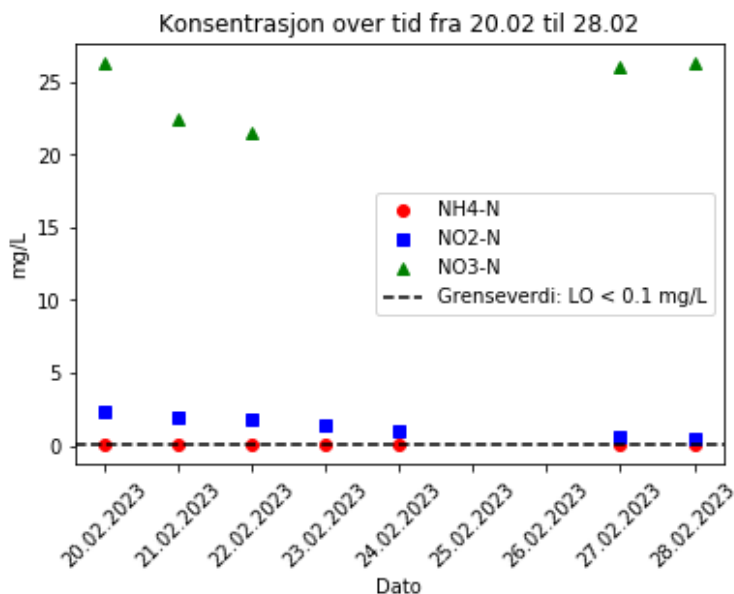


Figur 5.6: Periode 2 - Første del av februar: Resultater fra perioden 01.02 til 09.02. Ammoniumklorid ble tilsatt 03.02 (5.6 g), 07.02 (6.0 g), 09.02 (5.1 g).

Periode 2 - Andre del av februar

I perioden mellom 09.02 til 20.02, ble det tilsatt ammoniumklorid den 10.02 (7.1 g), 15.02 (5.6 g), 16.02 (6.3 g), men det ble ikke tatt prøver disse dagene.

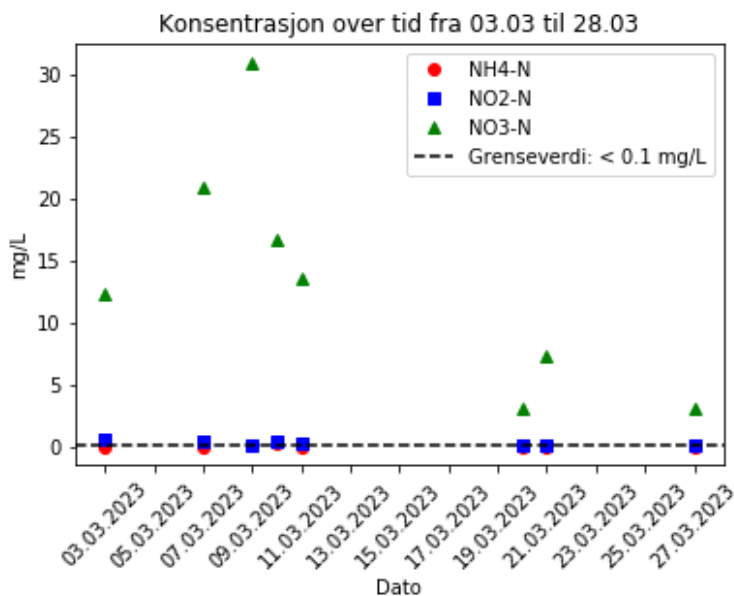
Figur 5.7 viser at nivået av ammonium var fortsatt lavt fra 20.02 til 28.02. Figuren illustrerer at det har vært en svak synkende trend for nitritnivået. Nitratnivået sank litt, men økte igjen 27.02. Ved at nitrat økte kan tyde på at det har blitt oppkonsentrasjon av nitrifiserende oksiderende bakterier (NOB), som omdanner nitritt til nitrat ved bruk av oksygen.



Figur 5.7: Periode 2 - Andre del av februar: Resultater fra perioden 20.02 til 28.02. Ammoniumklorid ble tilsatt 20.02 (7.1 g), 23.02 (7.9 g), 24.02 (6.5 g), 27.02 (7.3 g), 28.02 (7.6 g).

Periode 3 - mars

I Figur 5.8 kan man se at ammoniumkonsentrasjon fortsatt er lav, noe som kan indikere på at det kan ha blitt oksidert til nitritt, men resultatene viser at nitritnivået er lavt. Ved at Anammox-bakteriene kan benytte nitritt som elektronakseptor, så kan det sannsynliggjøre at Anammox-bakteriene eksisterer fortsatt i prosessen og omdanner ammonium. Figuren viser også en trend til synkende nitratkonsentrasjon.



Figur 5.8: Ammoniumklorid ble tilsatt 01.03 (6.7 g), 03.03 (6.7 g), 07.03 (8.0 g), 10.03 (6.1 g), 11.03 (9.2 g), 20.03 (5.6 g).

Det er flere mulige årsaker til at nivået av nitrat er lavt. En av årsakene kan være at det har foregått en simultan denitrifikasjon/Anammox-prosess i reaktoren. I en denitrifikasjonsprosess kreves det tilstedeværelse av en karbonkilde. Ved at det ikke har blitt tilsatt en ekstern karbonkilde til reaktoren, kan det være at bakteriene har benyttet døde celler (biomasse) for cellevekst som karbonkilde (endogen respirasjon). I simultan denitrifikasjon/nitrifikasjon, vil det være behov for karbon, og ved at det ikke ble tilsatt karbon under pilotforsøket, er denne årsaken mindre sannsynlig.

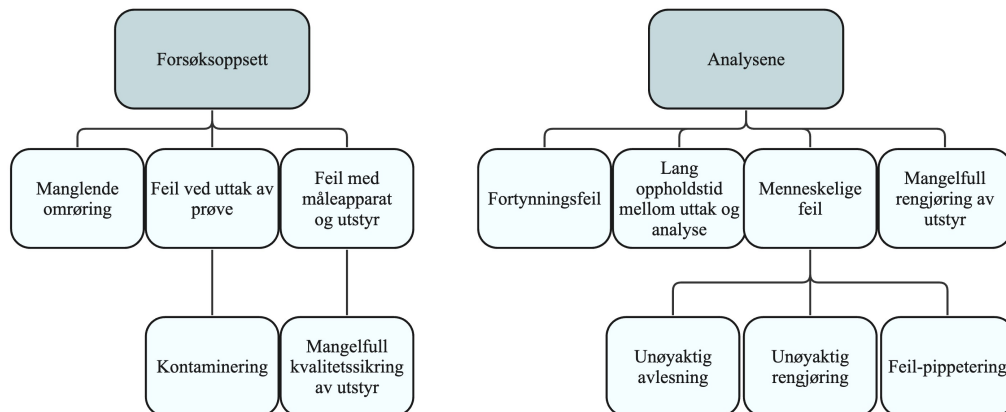
En mulig årsak kan også være at Anammox-bakteriene har fjernet ammonium ved å bruke nitrat som elektronakseptor, og at det er årsaken til hvorfor nitratkonsentrasjonen reduseres, som Figur 5.8 illustrerer. En forklaring til hvorfor nitrat reduseres, kan være at det ikke ble tilsatt ammonium mellom perioden 11. til 20. mars. Den 20. mars ble det tilsatt omtrent 5.6 gram. Nitratnivået var redusert den 27. mars og forklaring til hvorfor nitratnivået ble redusert, kan være at det ikke var nok næring tilgjengelig for bakteriene.

På den andre siden, så kan en mulig forklaring være at det ble tatt ut en større mengde i prøveuttaket, den 11. mars. Det ble tilsatt drikkevann for å etterfylle mengden som ble tatt ut. Avløpsvannet i reaktoren ble av den grunn fortynnet den 11. mars. Ved prøveuttaket kan det ha vært at en del av bakteriene i biomassen forsvant, eller så kan det være at bakteriene har blitt påvirket av fortynningen. Samtidig, ved at nitratnivået ble redusert, kan det være med å sannsynliggjøre at det kan være Anammox-bakterien som kan ha benyttet nitrat som elektronakseptor.

Hvis Anammox-bakteriene har overlevd kan det indikere at de kan tåle et temperatursjokk og kan trives under mer fortynnet avløpsvann. Det kan være flere årsaker enn de som er tidligere nevnt til at konsentrasjonene av ammonium, nitritt og nitrat varierer. I tillegg kan det ha skjedd en fortynning ved at ble tilsatt omtrent 250 milliliter med vann når ammoniumklorid og natriumbikarbonat har blitt tilsatt. Det kan være at ammonium, nitritt og nitrat har blitt tatt ut av reaktoren ved prøveuttak, men denne årsaken er mindre sannsynlig ved at pilotforsøket var basert på en biofilm-prosess.

5.2 Feilkilder

Det kan være flere feilkilder og usikkerhet knyttet til gjennomføring av pilotforsøk som kan påvirke resultatene. Figur 5.9 viser forslag til noen av feilkildene knyttet til forsøksoppsettet og analysene:



Figur 5.9: Forslag til feilkilder knyttet til pilotforsøket.

5.2.1 Forsøksoppsett

Ved bruk av dette forsøksoppsettet har det vært manglende muligheter for omrøring. For å få til en mulig omrøring, ble det tilsatt mer oksygen. Dette kan ha ført til at Anammox-bakteriene har blitt utkonkurrert av de nitrifiserende bakteriene, ved at Anammox-bakteriene sannsynligvis ikke vil overleve under så høye oksygenkonsentrasjoner som det har vært i forsøket. En av usikkerhetene i forsøksoppsettet er om oksygenmåleren har vist for høy verdi. Dette kan enten skyldes en feil i måleutstyret, som indikerer at oksygenkonsentrasjonen som ble målt burde ha vært lavere. I motsetning til Bekkelaget som hadde en oksygenkonsentrasjon på 0.86 milligram per liter (Tsui, 2023). Oksygenkonsentrasjonen i pilotforsøket ble målt under lufting. På grunn av begrensningene med forsøksoppsettet har det vært utfordrende å få til en jevn blanding i reaktoren over hele forsøksperioden, som kan påvirke hvor representative prøvene er. I tillegg til at det har vært manglende reagenser periodevis.

5.2.2 Analysene

Det kan ha vært menneskelige feil som har påvirket resultatene. Det kan blant annet ha vært unøyaktig avlesning, unøyaktig rengjøring av utstyr og feil-pippetering. I tillegg kan det ha vært feil med måleapparatet og utstyret som ble benyttet til analysene. En mulig årsak til at nivået av ammonium har vært lavt over forsøksperioden, kan være at det har vært for lang oppholdstid mellom prøveuttak og analysene, slik at ammonium har blitt oksidert. Samtidig, så har det blitt benyttet en beholder med lokk, men beholderen kan nødvendigvis ikke ha vært tett nok. En annen mulig feilkilde, er at det ble benyttet et filtreringssteg før analysene, hvor det kan være at noe av ammonium-, nitritt- og nitratmolekylene har blitt filtrert ut. Ved videre arbeid bør det gjøres målingen av vekten til filteret før og etter filtrering. I tillegg er det svært usikkert å benytte et pH-papir, som tidligere nevnt.

5.3 Oppsummering av kapittel

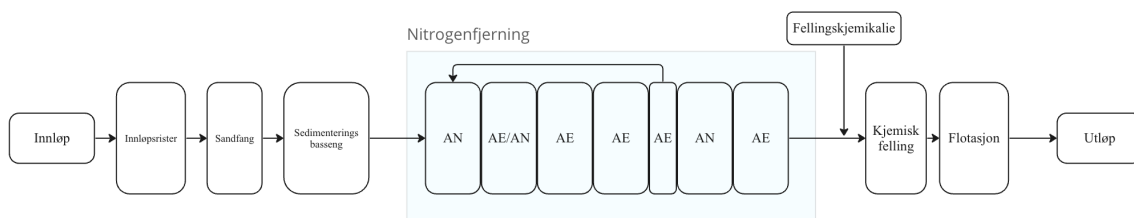
I dette kapitlet har resultatene fra pilotforsøket blitt presentert. Basert på resultatene fra pilotforsøket kan det være vanskelig å si hvor sannsynlig det er at Anammox-prosessen kan egne seg for bruk på kaldt og fortynnet avløpsvann. Problemstillingen diskuteres videre under vurderingskapitlet (Kapittel 7).

6. Resultat: Forslag til design av Anammox på hovedstrømmen

I dette kapitlet blir det presentert forslag til design for hvordan man kan implementere Anammox som en del av hovedstrømmen. Denne delen retter seg i hovedsak til forskningsspørsmålet:

”Hvilke forutsetninger er viktig for å oppnå en effektiv fjerning av nitrogen ved bruk av Anammox-prosessen?”

6.1 Eksisterende løsning



Figur 6.1: Forenklet flytskjema over NFRA sin renseprosess. AE = Aerob reaktor med lufting, ANA = Anaerob reaktor uten lufting. Fritt gitt (Nordre Follo renseanlegg (NFRA), [udatert](#))

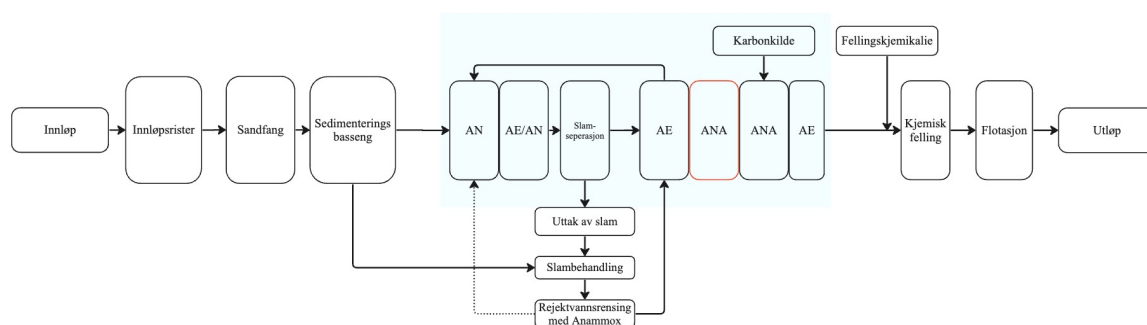
Figur 6.1 viser et forenklet flytskjema til Nordre Follo renseanlegg (NFRA). Anlegget består av innløpsrister, sandfang, sedimenteringsbasseng, nitrogenfjerningssteg med for- og etterdenitrifikasjon. Prosessen for nitrogenfjerning består av syv trinn. I den første reaktoren foregår for-denitrifikasjon hvor organisk stoff fra avløpsvannet blir benyttet som karbonkilde, og dermed brutt ned. Returstrømmen av nitritt eller nitrat er fra reaktor 5. For å sikre lavt oksygenivå i returstrømmen er det en reaktor uten lufting (nummer 5), før etter-denitrifikasjonssteget. Den andre reaktoren består av både en omrører og en mulighet for lufting. Videre foregår nitrifikasjon hvor nitritt og nitrat blir dannet, før et nytt denitrifikasjonssteg. Her blir nitritt og nitrat omgjort til nitrogen-gass. Til slutt er det et aerob steg som fjerner eventuell resterende karbonkilde. (Nordre Follo

renseanlegg (NFRA), [udatert](#); Ødegaard, 2022)

I nitrogenfjerningssteget blir organisk karbon og nitrogen fjernet, samtidig som det antas at en liten del av dette, i tillegg til andre parametere, blir fjernet i forbehandlingen. I det kjemiske rensetrinnet blir fosfor fjernet. NFRA har Anammox-prosessen som en del av rejektivannrensingen i dag, som er skrevet om i et tidligere kapittel. Rejektivannet fra Anammox-prosessen føres i dag direkte til for-sedimenteringen. (Nordre Follo rensesanlegg (NFRA), [udatert](#)).

6.2 Forslag 1 - Design av Anammox

Et forslag til et design for hvordan man kan implementere Anammox-prosessen på hovedstrømmen er presentert i Figur 6.2:



Figur 6.2: Forslag til en design med Anammox (i rødt). AE = Aerob reaktor med lufting, ANA = Anaerob reaktor uten lufting

Erfaringer fra litteraturstudiet tilsier at det er viktig med god forbehandling, det vil si at det er blant annet viktig å bryte ned organisk materiale. Forslaget til biologisk nitrogenfjerning er presentert i den blå firkanten i figuren. Den første reaktoren er en anaerob reaktor med for-denitrifikasjon. Her blir organisk materiale, som er i avløpsvannet, brutt ned av hetrotrofe bakterier, for å unngå oppkonsentrasjon av hetrotrofe bakterier i reaktorer senere i renseprosessen.

Det er foreslått et vekselvis kammer, som både har muligheter for tilgang til å operere som aerobt og anaerobt. Det vil være fordelaktig hvis det er forventet mye nedbør til anleggene, og dette medfører at temperaturen kan reduseres og påvirke renseprosessen. Ved slike hendelser kan veksthastigheten til bakteriene reduseres, og det kan være behov for lengre oppholdstid for å sikre at alt organisk materiale er brutt ned. (Ødegaard, 2022)

Videre blir ammonium oksidert til nitritt i den høybelastede reaktoren etter slamseparasjon. Det legger til rette for forutsetningene for Anammox-bakteriene. I renseprosessen kan det bli dannet nitrat som fører til at det kan anbefales å implementere en returstrøm til den første reaktoren. Det hadde muligens vært fordelaktig å ha et aerobt trinn til, slik at oksygenivået i vannet kan bli redusert, før vannet ble transport til den første reaktoren (Ødegaard, 2022). Ved at det er nitrat og organisk materiale i den første reaktoren, kan det foreløpe en for-denitrifikasjon hvor nitrogen kan bli fjernet fra avløpsvannet.

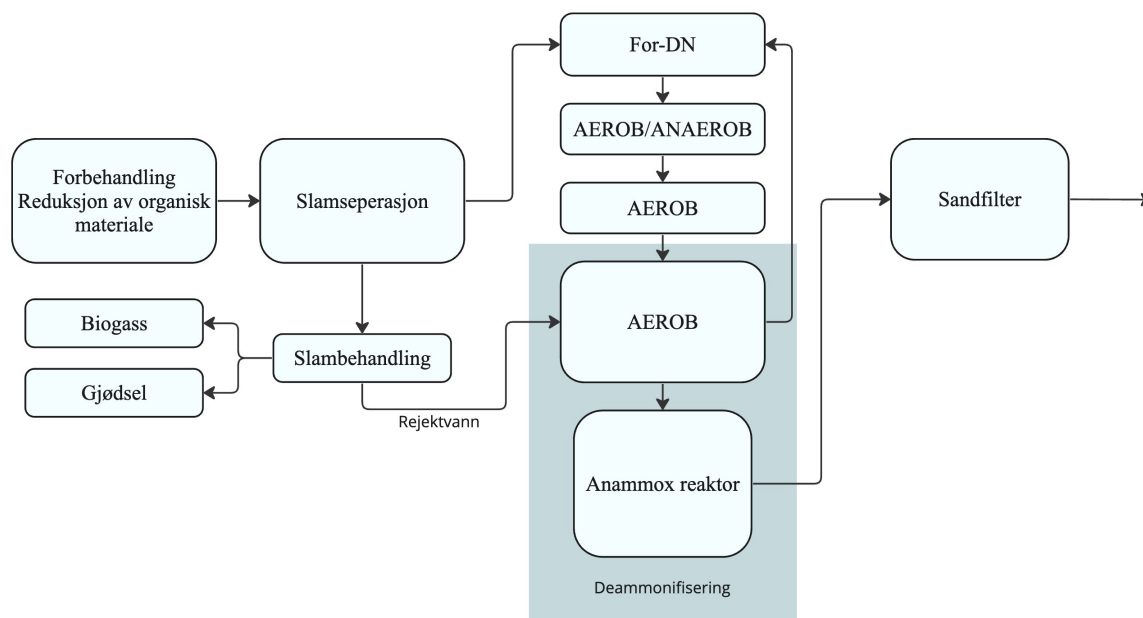
Reaktoren med Anammox-bakteriene er illustrert i rødt. Et forslag er å tilføre vannet fra Anammox-reaktoren på sidestrømmen. Dette vil føre til at belastningen inn til Anammox-reaktoren vil mest sannsynlig være nitritt og resterende ammonium, som vil bidra til gode forutsetninger for Anammox-bakteriene. Samtidig, så kan en løsning være å transportere avløpsvannet til den første reaktoren (striplet linje). Etter reaktoren med Anammox-bakteriene kan det være en anbefaling å ha en anaerob reaktor i etterkant. Hensikten med dette er å fjerne eventuell resterende nitrat, i et etter-denitrifikasjonssteg. Til slutt er det foreslått å ha en aerob reaktor, som fjerner eventuell resterende karbon og ammonium.

Ved design av et renseanlegg er det flere faktorer som spiller inn som for eksempel avløpsvannets sammensetning. Avløpsvannet kan inneholde flere tungemetaller og industriavlop, som gjør at man bør ha bedre forbehandling siden biologiske renseprosesser kan være sårbare for inhiberende stoffer. Det kan være aktuelt å implementere enda et aerobt trinn før Anammox-reaktoren fordi det er nødvendig med å sikre god forbehandling. Samtidig som det kan medføre mer arealbruk og energi knyttet til lufting.

På den andre siden, bør man studere mer hvordan effektiviteten til Anammox-bakteriene er, og sikre gode forutsetninger for vekst. Dette kan medføre at man kan se på muligheten for å fjerne etter-denitrifikasjonssteget og det siste aerobe trinnet. Samtidig som dette vil være en sikkerhet for den totale renseprosessen for nitrogen. Dersom Anammox-prosessen er ute av drift, vil et aerob trinn være med på fjerne noe av organisk stoff og ammonium.

6.3 Forslag 2 - Design av Anammox

Figur 6.3 viser et annet alternativ til hvordan man kan designe Anammox på hovedstrømmen:



Figur 6.3: Forenklet flytskjema for forslag 2. Hvor aerobe reaktorer inkluderer luftesystem og anaerobe reaktoren inkluderer en omrører. Fritt etter (WRF (The Water Research Foundation)., 2019; Ødegaard, 2018).

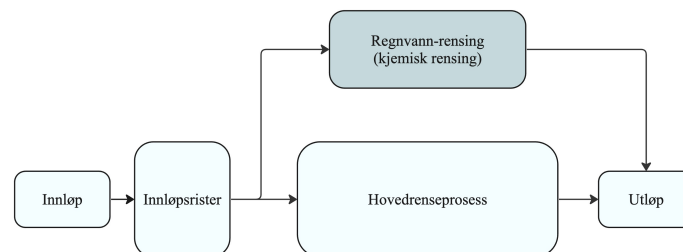
Forslaget er en kombinasjonsprosess, hvor avløpsvann fra rejektivannet og hovedstrømmen blir sendt i samme system med Anammox-bakteriene. Fordelen med prosessen er muligheten for å sikre en høyere temperatur på avløpsvannet, samtidig som det å ha to nitrogenfjerningsprosesser, vil være med på å øke kapasiteten for nitrogenfjerning. En mulig løsning er også å ha et IFAS-system. Dette kan være med på å sikre bedre vekstforhold for Anammox-bakteriene, ved at det er kontinuerlig tilførsel av Anammox-bakterier til prosessen, slik at de ikke blir utkonkurrert av NOB. (Ødegaard, 2018)

Ved å ha en reaktor på hovedstrømmen og en på rejektivannet, så vil man fortsatt få fjernet nitrogen selv om en av prosessene er ute av drift. Imidlertid kan det være en løsning å ha flere paralleller, men samtidig er det nok forventet at et anlegg med Anammox-prosessen vil kreve litt mer areal, basert på at Anammox-bakteriene er saktevoksene. (Ødegaard, 2018)

Et forslag er å implementere et sandfilter i etterkant for å øke driftssikkerheten, som ble sett på i CENTRIELA-studien. Dette kan være et bidrag for å oppnå rensekraften for nitrogen. (Hendrickx mfl., 2017).

6.4 Løsning for økte mengder med fremmedvann

Biologiske renseprosesser er sårbare for mye fremmedvann inn på anleggene. Ved at Anammox-bakteriene er saktevoksende, kan de ved lave konsentrasjoner bli utkonkurert. Imidlertid, kan et forslag være å implementere et overvannrensaneanlegg, som de har på NRVA (Nordre Romerike Vann og Avløp). Dersom anlegget mottar større mengder med fremmedvann inn på renseanlegg, vil det sendes til overvannrensaneanlegget med kjemisk felling som rensetrinn. Fordelen er at løsningen kan være med på å minimere mengden fremmedvann inn til den biologiske renseprosessen, og samtidig minimere direkte overløp til resipienten. På den andre siden en løsning med et overvannrensaneanlegg føre til et større areal på renseanlegg og økte kostnader knyttet til kjemikalier. (NRVA IKS, [udatert](#))



Figur 6.4: Forslag til løsning når det tilføres mye fremmedvann til anleggene. Fritt etter NRVA (NRVA IKS, [udatert](#)).

6.5 Oppsummering av kapittel

I kapitlet har forslag til ulike design for Anammox blitt presentert. Fordelene og ulemene blir videre vurdert i Kapittel 7.

7. Vurderinger

Figur 7.1 viser en oppsummering av forskningsspørsmålene, metodene som har blitt benyttet, erfaringer og et forslag til videre arbeid:

	Mål	Metode	Konklusjon	Videre arbeid
Forskningsspørsmål 1	Hvilke erfaringer ligger til grunn for implementering av Anammox-prosessen på fortynnet og kaldt avløpsvann?	Litteraturstudie og befaringer	Utfordringer med prosessen under 10 grader Celsius. Energieffektiv prosess	Gjennomføre nytt pilotanlegg og teste ut metoder for å redusere vekst av NOB blant annet.
Forskningsspørsmål 2	Hvordan kan pilotforsøk bidra til å bekrefte om Anammox-prosessen kan være en effektiv metode for fjerning av nitrogen i fortynnet og kaldt avløpsvann?	Enkel pilotforsøk	Pilotforsøk kan være utfordrende å få til på laboratorieskala mtp forsøksbegrensningene.	Gjennomføre flere pilotforsøk på anlegg med eksisterende Anammox-reaktor på sidestrømmen
Forskningsspørsmål 3	Hvilke forutsetningene og betingelsene er viktig for å oppnå en effektiv fjerning av nitrogen ved bruk av Anammox-prosessen?	Forslag til design av Anammox på hovedstrøm	God forbehandling God prosessstyring	Gjennomføre modellering for å få et bedre estimat for areal, utslipp og muligheter

Figur 7.1: Figuren viser de tre forskningsspørsmålene som har blitt diskutert i oppgaven, i tillegg til forslag til erfaringer og videre arbeid.

7.1 Hvilke erfaringer ligger til grunn for implementering av Anammox-prosessen på fortynnet og kaldt avløpsvann?

Det er enighet mellom studiene fra litteratursøket at det er flere fordeler med renseprosessen Anammox. I Anammox skjer en delvis nitrifisering og resterende ammonium blir omdannet til nitrogengass. Dette forklarer hvorfor det blir lavere energiforbruk, tillegg til en mulighet for å oppnå energinøytrale renseanlegg og reduserte driftskostnader. Å benytte seg av renseprosessen Anammox som en del av nitrogenfjerning på renseanlegg kan gi et positivt bidrag til miljøet.

Tidligere forskning gir oss en rekke eksempler på at det kan være utfordrende å drifte Anammox ved lavere temperaturer. En årsak som har blitt diskutert i flere studier er at Anammox-bakteriene blir utkonkurrert av NOB (nitrittoksiderende bakterier), på grunn av at Anammox-bakteriene er saktevoksende. Oppkonsentrasjon av NOB kan virke hemmende for prosessen. Flere av studiene som har sett på Anammox på kaldt og fortynnet avløpsvann konkluderer med at det bør forskes mer på hvordan man kan redusere vekst av NOB. Høy oksygenkonsentrasjon kan føre til en økning av NOB, som er en mulig årsak til at NOB-konsentrasjonen øker.

Ved å studere reaksjonslikningen for Anammox (Reaksjonslikning 2.4) kan man se at det blir produsert nitrat. Ved at Anammox-prosessen er en anaerob prosess, er det ikke oksygen tilstede. En mulig hypotese til hvorfor det har blitt skrevet nitrat i likningen, kan være fordi nitritt blir oksidert til nitrat, men denne prosessen krever oksygen. Videre bør det vurderes å legge til et trinn med oksygen, hvis forklaringen er at noe blir nitrifisert. Reaksjonslikningen bør studeres nærmere i et videre arbeid.

7.2 Hvordan kan pilotforsøk bidra med å bekrefte om Anammox-prosessen kan være en effektiv metode for å fjerne nitrogen i kaldt og fortynnet avløpsvann?

Formålet med pilotforsøket var å få en indikasjon på hvor vidt Anammox-bakteriene vil klare seg ved kaldere temperaturer og fortynnet avløpsvann. Ved at pilotforsøket ble gjennomført som et batch-forsøk, har det ikke vært en kontinuerlig strømning gjennom reaktoren. Dette har ført til en lengre oppholdstid for bakteriene i reaktoren og gode vekstvilkår for bakteriene.

7.2.1 Resultater

Det er flere interessante observasjoner fra pilotforsøket. En av observasjonen er at nivåene for ammonium og nitritt har vært lave, til tross for at det jevnlig har blitt tilsatt ammonium. Dette kan tyde på at nitrogen har blitt fjernet fra reaktoren. Samtidig har det ikke blitt tilsatt en karbonkilde under forsøket, som kan være med på å sannsynliggjøre at Anammox-bakterier er tilstede i reaktoren.

Resultatene tyder ikke på at nitrat har akkumulert over forsøksperioden. En mulig årsak er at Anammox-bakteriene kan ha benyttet nitrat som elektronakseptor. På den andre siden, kan dette også forklares ved at det har foregått en simultan denitrifikasjon/Anammox-prosess. Denitrifiserende bakterier har redusert nitrat til nitritt, men som litteraturen beskriver så krever det tilsetning av en karbonkilde. Det ble ikke tilsatt karbon under forsøket, så en mulig forklaring er at det har foregått endogen respirasjon. Her benytter bakteriene døde celler for cellevekst.

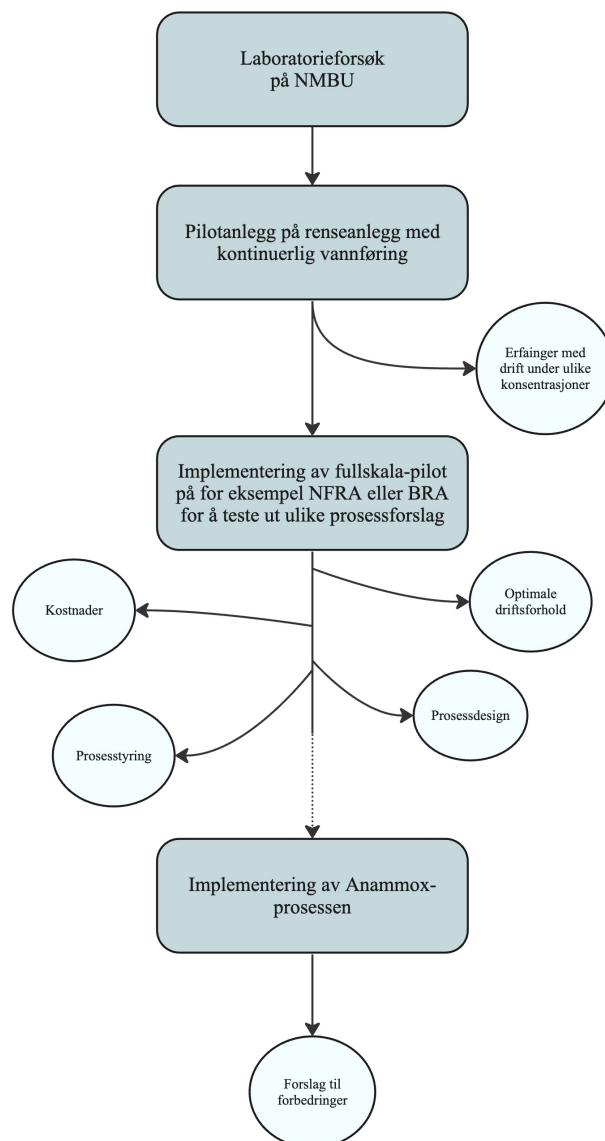
Det kan være en sannsynlighet for at nitrat har blitt benyttet som elektronakseptor, som bør gjøres videre studier på. En av fordelene er at dette vil være med på å fjerne nitrat som eventuelt dannes i prosessen. Samtidig, så er det et sammensatt økosystem i biologiske renseprosesser, som betyr at det kan også være andre bakterier til stede i prosessen. Det bør derfor gjennomføres en DNA-sekvensering ved et nytt pilotforsøk for å undersøke den mikrobielle sammensetningen i reaktoren.

7.2.2 Forslag til videre testing med pilotforsøk

Metodeoppsettet som har ble benyttet i denne studien har forbedringspotensiale. Resultatene kan indikere på at det burde vært noen flere stabile faktorer, som for eksempel mengden tilsatt ammoniumklorid, jevnlig testintervaller og flere avluftingsperioder. Vi-

dere forskning bør være automatisert eller gjennomføres som semi-kontinuerlig (SBR).

Det er nødvendig med videre testing før man kan begrunne om Anammox-prosessen kan være et effektivt bidrag for nitrogenfjerning på hovedstrømmen. Figur 7.2 viser et forslag til videre forskning. Dette kan gi erfaringer med ulike driftsforhold, og det bør videre vurderes å implementere i større skala. Pilotforsøket bør eventuelt settes opp på for eksempel NFRA eller BRA hvor de har en reaktor med Anammox-bakteriene på rensanlegget. Dette kan gjøre det enklere å benytte (og eventuelt etterfylle) biomasse til anlegget. Det gir også muligheten for å teste ut med kontinuerlig tilførsel av kommunalt avløpsvann. Ved å øke forsøksperioden, kan man få erfaringer knyttet til sesongvariasjoner, optimale driftsforhold for Anammox og forslag til prosessdesign.



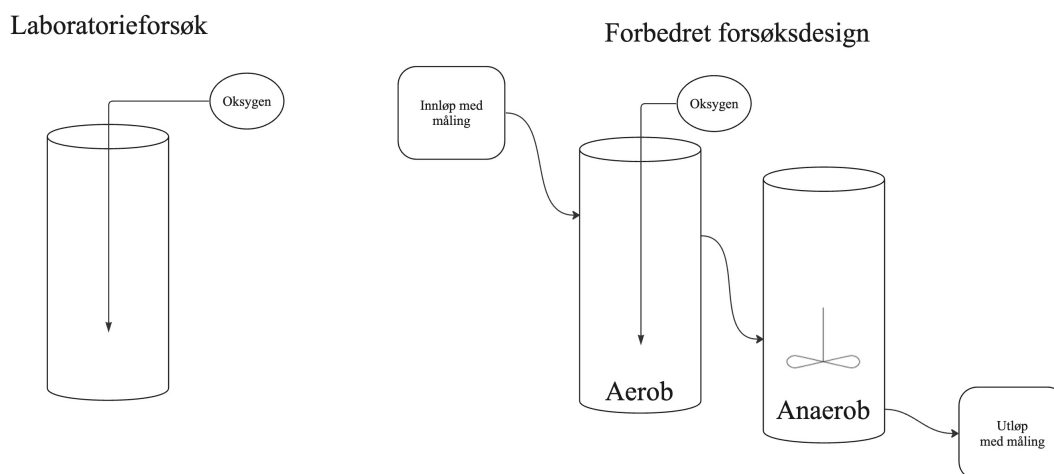
Figur 7.2: Viser forslag til en videre forskningsplan, med tilhørende informasjon om hvilke erfaringer man kan innhente fra pilotforsøkene.

7.2. HVORDAN KAN PILOTFORSØK BIDRA MED Å BEKREFTE OM ANAMMOX-PROSESSEN

I pilotforsøket som ble gjennomført under oppgaven, var temperaturen på omtrent 16°C gjennom perioden. Ved videre forskning kan det være fordelaktig å teste med lavere temperaturer under 10°C, basert på at avløpsvannet inn til rensesanleggene kan bli på 4°C også.

7.2.3 Forslag til et forsøksoppsett ved videre testing

Figur 7.3 viser et forslag til et forbedret forsøksdesign, sammen med laboratorieforsøket som ble gjennomført under masteroppgaven:



Figur 7.3: Forslag til et forbedret forsøksdesign er vist til høyre, sammen med laboratorieforsøket vist til venstre.

Det bør tilsettes en større mengde med avløpsvann til reaktoren, slik at prosessen kan bli testet under større volum. Forsøket bør oppdateres fra et batch-forsøk til et forsøk med kontinuerlig tilførsel av avløpsvann. Da får man mulighet til å teste ulike sammensetninger av avløpsvann, for å studere hvordan Anammox-bakterier responderer på tilførsel av nitrogenrikt og nitrogenfattig avløpsvann.

Ved et oppsett med kontinuerlig tilførsel av avløpsvann kan det være nødvendig med enda en reaktor, som kan fjerne organisk materiale og sikre god forbehandling i forkant av Anammox-prosessen. Ved videre forskning kan man implementere en reaktor som er aerob (delvis nitrifikasjon) etterfulgt av anaerob reaktor (med Anammox). Det kan være fordelaktig ved at man ikke er avhengig av at slå av og på lufttilførselen. Dette kan være løsningen på utfordringene som ble erfart i pilotforsøket med for høy oksygentilførsel.

7.3 Hvilke forutsetninger er viktig for å oppnå effektiv fjerning av nitrogen ved bruk av Anammox-prosessen på hovedstrømmen?

Ved design av Anammox på hovedstrømmen er det flere forutsetninger som bør bli tatt hensyn til. God forbehandling er en forutsetning for å tilrettelegge for gode vekstvilkår, slik at Anammox-bakteriene trives i økosystemet. I tillegg, hvis man har lite ammonium i reaktoren og mye nitritt, kan man få en oppkonsentrasjon av NOB, som kan føre til at det blir dannet nitrat. Ved videre arbeid bør det studeres mer om mulige løsninger for å benytte nitrat som elektronakseptor, redusere nitrat til nitritt eller muligheten for å fjerne nitrat.

Tidligere erfaringer gir oss flere eksempler på å benytte Anammox som en del av renseprosessen for rejeftvann og det kan være et positivt bidrag for den totale renseeffekten for nitrogen på et renseanlegg. Dersom forholdene tillater det, kan det være fordelaktig å ha to Anammox-reaktorer, hvor den ene er på hovedstrømmen og den andre på rejeftvannet. Dette gir fordelene av å ha to reaktorer med ulike biologiske forhold. Å ha to prosesser for nitrogenfjerning vil være gunstig hvis en av reaktorene er ute av drift.

Oppsummert, har det i designkapitlet blitt sett på muligheten for å implementere Anammox direkte på hovedstrømmen. Alternativt har det blitt foreslått å kombinere Anammox med etter-denitrifisering. Designforslagene vil variere avhengig av avløpsvannets sammensetning og rensekrav. Ved å implementere ett etter-denitrifikasjonssteg, vil det bli nødvendig med en karbonkilde, men karbonmengden vil redusert sammenlignet med hvis man ikke har en Anammox-prosess i forkant. Det finnes flere designvarianter og et forslag som har blitt diskutert er å benytte et system hvor man har et kombinasjonsanlegg for både hovedstrømmen og sidestrømmen (forslått i Figur 4.13). Alternativt, en løsning hvor man kun tilfører en mengde med slam fra Anammox-reaktoren på sidestrømmen tilbake til hovedstrømmen.

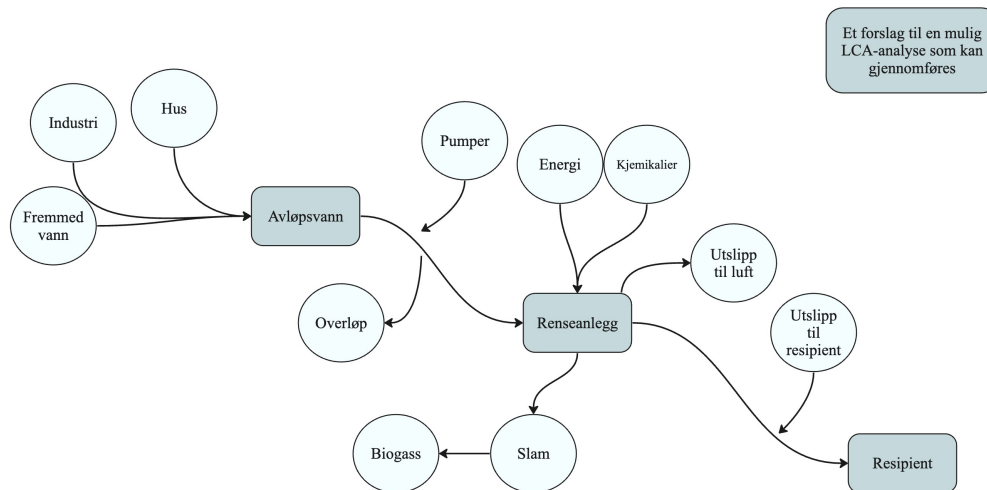
På den ene siden, så vil kanskje det å benytte seg av et kombinasjonsanlegg føre til strengere krav til restvolumet og et behov for en større reaktor. På den andre siden kan det å benytte nitrogenrikt vann fra Anammox-reaktoren eller direkte fra slambehandlingen være med på å øke temperaturen i renseanlegget og sikre mer optimale biologiske forhold i reaktoren. Det bør vurderes ulike forbehandling- og slamseperasjonsteg. I litteraturen presenteres det resultater som kan vise at slamseperasjon kan være utfordrende å få til under ti grader.

I videre forskning av Anammox-prosessen på hovedstrøm, så anbefales det å gjennomføre beregninger og modelleringer for å underbygge problemstillingen. Det eksisterer ikke i dag en standard for å hvordan man kan designe og dimensjonere Anammox på hovedstrømmen. Modelleringer kan være med på å få mer kunnskap om ressursforbruk, utslipp og for eksempel hvordan fremmedvann kan påvirke prosessen gjennom simuleringer. Dette kan være med å forklare for hvordan man bør designe Anammox under kaldt og fortynnet avløpsvann, samtidig som man kan få et overblikk over kostnader, utslipp og areal.

Ved videre studier av Anammox kan man se på maskinlæring og prosesskontroll. Det bør bli sett mer på muligheten for å ha flere bassenger som både har mulighet for å være aerobe og anaerobe, for å ta høyde for variasjoner i avløpsvannet. Flere av studiene nevner at høyt oksygennivå kan være en årsak til oppkonsentrasjon av NOB. Maskinlæring kan bli benyttet til å predikere avløpsvannets sammensetning ved innløpet, og kan være med på å sikre gode vekstforhold i reaktorene. Dette øker investeringskostnadene, men samtidig være med på å skape sikrere drift, som er en viktig forutsetning for å drifte Anammox-prosessen.

7.4 Anammox som et bidrag for å redusere nitrogen til Oslofjorden

Anammox-prosessen kan være et effektivt bidrag for å redusere nitrogentilførselen til Oslofjorden. Det bør samtidig gjennomføres en livsløpsanalyse (LCA) for å se på klimafotavtrykket i hvert steg av prosessen. I en LCA blir alle utslipp regnet om til samme enhet, som gjør at man kan få en indikasjon på hvilke faktorer som gir det største klimafotavtrykket. Å gjennomføre en livsløpsanalyse kan bidra til å skape bevissthet på sirkulære systemer, ved å kartlegge de største utslippene og den totale miljøbelastningen. Et forslag til hvilke faktorer man bør se på i klimaregnskapet er presentert i Figur 7.4. (LCA.no, 2023).

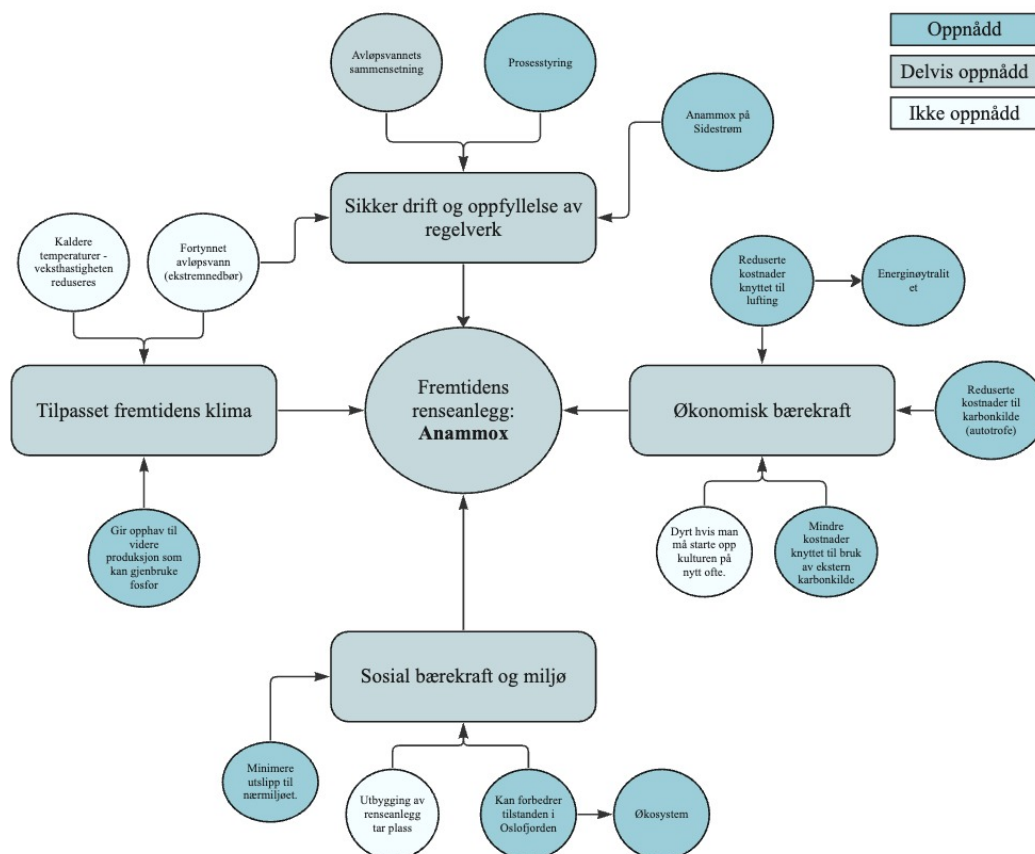


Figur 7.4: Et forslag til faktorer man kan se på ved gjennomføring av en livsløps-analyse (LCA).

Figur 7.4 viser forslag til faktorer man kan se på ved gjennomføring av en LCA. Fordelelen med Anammox i motsetning til denitrifikasjonsprosesser er at det ikke er nødvendig med en karbonkilde eller eventuelt redusert mengde, hvis man designer en kombinasjonsløsning med både Anammox og etter-denitrifikasjonsprosess. Kjemikalier kan føre til et høyt klimafotavtrykk, men det bør studeres nærmere hvilke utslipp Anammox-prosessen kan medføre også. Dette er vurderinger som bør tas i betraktning når man ser på klimagassregnskapet og hvordan Anammox er et bidrag i den sirkulære løsningen. En vurdering som bør bli sett på er forholdet mellom utslipp til luften ved bruk av Anammox. Videre bør man se dette i sammenheng med utslippene til resipienten, som kan være Oslofjorden. Dette bør bli sett på over en lengre tidsperiode for å få grunnlag for om Anammox-prosessen vil være den mest bærekraftige prosessen på sikt.

I en LCA-analyse bør man også gjøre vurderinger for å sammenligne å bruke Anammox mot andre nitrogenfjerningsprosesser, og sammenligne for eksempel bruk av mer bærekraftige alternativer av karbonkilde til denitrifikasjonsprosesser. Studien som ble gjennomført ved Hammarby Sjöstadverk nevner også at karbondioksidutslippet og lystgassutslippet er lavere for Anammox-prosessen enn for nitrifikasjon/denitrifikasjonsprosesser. Studien som ble gjennomført på Dokhaven WWTP viser også til lavere lystgassproduksjon. Beregningsmetodene for å finne ut bakgrunnen for tallene, bør studeres nærmere i videre studier. Allikevel, gir dette en indikasjon på at Anammox kan være en bærekraftig løsning.

Basert på det oppdaterte avløpsdirektivet med forventet strengere renskrav, er det dermed forventet at flere rensanlegg må oppgraderes. Ved utbygging bør man bygge ut rensanlegg som møter FN's (De Forente Nasjoner) bærekraftsmål. I introduksjonskapitlet ble det nevnt fire faktorer som kan være sentrale for dette: Sikker drift og oppnåelse av regelverk, økonomisk bærekraft, sosial bærekraft og miljø, i tillegg til å være tilpasset fremtidens klima. Hvor vidt Anammox-prosessen er et svar på en løsning for fremtidens rensanlegg og disse faktorene, er vist i Figur 7.5:



Figur 7.5: Oversikt med vurdering av Anammox som en bærekraftig rensemetode for nitrogenfjerning. Desto mørkere blåfarge, desto mer grad av sannsynlighet for oppnåelse.

Som Figur 7.5 viser kan man se at å bruke Anammox-prosessen kan være en løsning for å bygge ut fremtidens klimapositive og energieffektive rensanlegg. Figuren viser at desto mørkere blåfarge det er, desto større grad er faktoren definert som "oppnådd". Dersom prosessen er ute av drift og stopper, kan det føre til at det kan ta lang tid før prosessen starter opp igjen, som vil medføre høyere utslipp til resipienter som Oslofjorden. Det er nødvendig med mer kompetanse om Anammox-prosessen og hvordan prosessen kan være et effektivt bidrag for å redusere nitrogentilførselen til Oslofjorden. I tillegg til å se på hvordan prosessen kan kombineres med blant annet gjenbruk av næringsstoffer.

Anammox-prosessen kan være en løsning for energinøytralitet, ved at prosessen blant annet krever mindre lufting under optimale driftsforhold. Andre metoder for å oppnå energinøytralitet kan være å installere for eksempel solcellepaneler eller vindmøller. På den andre siden er det ofte begrenset med plass rundt renseanleggene og noen ligger inne i fjellhaller. Dersom man bygger ut arealkrevende renseanlegg, kan det påvirke den sosiale bærekraften for området. Dette gir et grunnlag for å se mer på Anammox-prosessen for å være med på å sikre at den økonomiske og sosiale bærekraften ivaretas.

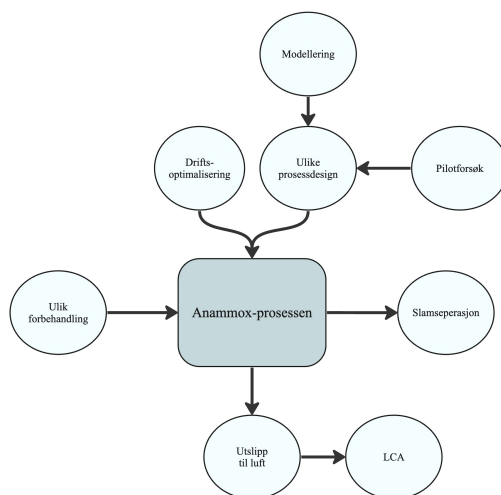
Bruk av Anammox-prosessen kan være et bærekraftig alternativ for nitrogenfjerning. Ved at det ikke er nødvendig med en karbonkilde, vil kostnadene bli redusert. Utfordringene er at bakteriene er saktevoksende og kan ved lavere temperaturer føre til at bli vanskelig å oppfylle et krav om 85% renseeffekt, uten stort nok areal for å sikre tilstrekkelig oppholdstid. Ulike design og renseprosesser på rejektivannet, kan være et effektivt bidrag for å øke den totale renseeffekten. For å sikre sikker drift, bør det implementeres et styringssystem som kan påvirke at avløpsvannet sammensetning ikke har en betydning for den biologiske renseprosessen.

Ved utbygging av renseanlegg kan det forventes at det blir dyre investeringer. Flere rensenanlegg i dag klarer ikke å oppfylle rensekravene i avløpsdirektivet fra 2007, i tillegg til at nitrogenutslippet fra avløpsrenseanlegg til Oslofjorden nesten like stort som fra landbruket. I videre arbeid bør man i større grad kvantifisere gevinstene med redusert oksygenforbruk og ingen tilsetning av ekstern karbonkilde, opp mot dimensjonering for å se det totale kostnadsbildet og klimagevinsten.

Årsakene til den kritiske tilstanden i Oslofjorden er sammensatt og det er nødvendig med tverrfaglig samarbeid for å løse problemstillingene. Anammox-prosessen vurderes totalt sett, i følge Figur 7.5, som et bidrag til fremtidens klimapositive og energieffektive renseanlegg, som samtidig kan redusere nitrogentilførselen til Oslofjorden.

7.5 Forslag til videre arbeid

Det er fortsatt noen uavklarte spørsmål for å vurdere om bruk av Anammox-prosessen kan være et effektivt bidrag for å redusere nitrogentilførselen fra renseanlegg. Forslag til faktorer som bør studeres videre er presentert i Figur 7.6:



Figur 7.6: Forslag til faktorer som bør bli sett på for å vurdere modenheten for Anammox og videre arbeid

Vurderingsgrunnlaget legger til grunn for forslag til videre arbeid:

1. Gjennomføre beregninger og modelleringer for å gi et design- og dimensjoneringsgrunnlag. Se på ulike løsninger for å oppnå kravet om 85% fjerning av nitrogen, og de andre kravene i det oppdaterte avløpsdirektivet. Bør i større grad kvantifisere redusert oksygenforbruk og ingen tilsetning av karbonkilde opp mot kostnader, ressursforbruk og volum.
2. Mer omfattende erfaringsgrunnlag for bruk av Anammox på sidestrøm-, hovedstrøm- og kombinasjonsanlegg på kaldt og fortynnet avløpsvann.
3. Sammenligning med andre nitrogenfjerningsprosesser, blant annet ved å evaluere klimafotavtrykket og muligheten for biogassproduksjon, ved for eksempel en livsløpsanalyse.
4. Forskning på bruk av nitrat som elektronakseptor, og gjennomføre videre studier på reaksjonene som foregår i Anammox, med utgangspunkt i reaksjonslikningene.

8. Konklusjon

Denne studien har sett på hvordan renseprosessen Anammox kan være et effektivt bidrag som en del av utbyggingen av fremtidens bærekraftige nitrogenfjerningsanlegg. Tilstanden i Oslofjorden er kritisk og det er forventet strengere rensekrav for nitrogen i det oppdaterte avløpsdirektivet. Kunnskapshullet som var ønskelig å dekke i masteroppgaven var hvor vidt Anammox kan være egnet på hovedstrømmen. Det er fortsatt et forskningsområde i utvikling med mer nødvendig testing, for å klargjøre forutsetningene for bruk av Anammox på hovedstrømmen.

Det er enighet mellom studiene fra litteratursøket at Anammox-prosessen er et bærekraftig alternativ for nitrogenfjerning, basert på blant annet redusert energiforbruk og ingen tilsetning av ekstern karbonkilde. Samtidig, presiserer studiene at det kan være utfordrende å drifte Anammox under kaldt og fortynnet avløpsvann, på grunn av utkonkurrering av nitrittoksiderende bakterier. Det foreslås å forske mer på hvordan man kan legge til rette for bedre vekstforhold for Anammox-bakteriene og sikre god forbehandling.

Pilotforsøket som har blitt gjennomført tyder på at nitrogen har blitt fjernet i prosessen, men på grunn av begrensende faktorer i forsøksoppsettet, vil ikke resultatene gi nok grunnlag for å si om prosessen er egnet på hovedstrømmen. Et interessant funn i pilotforsøket er at det kan se ut som om nitrat har blitt redusert, uten at det har blitt tilsatt en karbonkilde. Ved videre studier bør det bli sett mer på hvordan man kan benytte nitrat som elektronakseptor, i tillegg til nitritt. Resultatene fra litteraturstudiet og befaringene tyder på at å implementere en reaktor med Anammox-bakterier på rejektivannet kan være et positivt bidrag for den totale renseseffekten. Ved design av Anammox på hovedstrømmen, kan det være fordelaktig med tilhørende Anammox-prosess på rejektivannet eller se på et kombinasjonssystem for rejektivannet og hovedstrøm.

For å konkludere, må det gjennomføres mer forskning for å si noe om hvor vidt renseprosessen Anammox kan være en løsning for å redusere nitrogentilførselen til Oslofjorden, blant annet med fokus på drift ved lave temperaturer. Litteraturen, pilotforsøket og designet som er foreslått legger til grunn for at hvis det er mulig å benytte Anammox på hovedstrømmen på renselanlegg, så vil det være et effektivt bidrag for å fjerne nitrogen på en bærekraftig måte.

Referanser

- Angeltvedt, T. A., Tsui, H. og Haugen, M. R. (mar. 2022). Gjenoppliving av sidestrøms nitrogenfjerning på Bekkelaget Renseanlegg. *Vannspeilet - Norsk Vann*: 44–46. URL: <https://norskvann.no/wp-content/uploads/vannspeilet2022-4.pdf>.
- Askheim, S. (mar. 2021). *Indre Oslofjord*. URL: https://snl.no/Indre_Oslofjord.
- Atkinson, W. (aug. 2013). *Breeding Better Bugs: Is Tiny Bacterium the Next Big Thing in Nitrogen Removal?*
- Driftspersonell på Nordre Follo renseanlegg (NFRA) (2023). *Driftsdata fra AnitaMox på NFRA*.
- FHI (mar. 2020). *Sosialt bærekraftige lokalsamfunn*. URL: <https://www.fhi.no/hn/folkehelse/artikler/sosialt-barekraftige-lokalsamfunn/>.
- FREVAR KF (apr. 2023). *FARA – nytt fremtidsrettet renseanlegg for Fredrikstad og Hvaler med globale mål og lokale tiltak*.
- Geilvoet, S. (mar. 2023). *Tilsendt informasjon om CENIRELTA-prosjektet, befarings på Dokhaven renseanlegg og Slujesjesjik slambehandlingsanlegg*.
- Grimstad, B. A. (aug. 2022). *Derfor kveles livet i Oslofjorden. Løsningen har vært kjent i flere tiår*. URL: <https://fagbladet.no/nyheter/derfor-kveles-livet-i-oslofjorden-losningen-har-vart-kjent-i-flere-tiar-6.107.891848.6cb161bc08>.
- Hansen, R. V. (mai 2022). *Behov for krav om nitrogenfjerning for avløpsrenseanlegg med tilknytning til Oslofjorden*. URL: <https://www.statsforvalteren.no/siteassets/fm-oslo-og-viken/miljo-og-klima/informasjon-fra-miljodirektoratet-vedrorende-nitrogenrensing.pdf>.
- Haugen, M. N. og Sonnenberg, C. B. (jul. 2021). *DNA-sekvensering*. URL: <https://snl.no/DNA-sekvensering>.
- Hendrickx, T., Vogelaar, J., Geilvoet, S., Duin, O., Taalman Kip, C. v. E., Hoekstra, M., Zoutberg, G., Veldhoven, J.-E. v., Danschutter, J. d., Ossterhuis, M., Kreuk, M. d., Loosdrecht, M. v. og Uijterlinde, C. (2017). *CENIRELTA: DEMONSTRATIEPROJECT ANAMMOX IN DE HOOFDSTROOM OP RWZI DOKHAVEN*. Tekn. rapp. STOWA. URL: <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202017/STOWA%202017-27.pdf>.
- Jia, M., Solon, K., Vandeplasseche, D., Venugopla, H. og Volcke, E. I. P. (des. 2019). *Model-based evaluation of an integrated high-rate activated sludge and mainstream anammox system*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894719322880>.
- Kjeldsen, R. og Bedin, T. (apr. 2020). *Nitrogenets kretsløp*. URL: <https://ndla.no/nb/subject:1:f2e831f5-2365-4ac8-bfce-4fc38323d91b/topic:1:aa019f6a-a569-4491-b0d2-c8d2df21733f/resource:752c9d7b-1593-4c98-8fdc-0484711328ce>.
- Kjensmo, J. og Hongve, D. (mai 2022). *eutrofiering*. URL: <https://snl.no/eutrofiering>.

- Klima- og miljødepartementet (mar. 2021). *Helhetlig tiltaksplan for en ren og rik Oslofjord med et aktivt friluftsliv*. Tekn. rapp. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/7e80a758716344cbbb97adc5c7c27f18/t-1571b.pdf>.
- Kofstad, P. K., Pedersen, B., Kaland, T. og Allkunne (jan. 2023). Nitrogen. URL: <https://snl.no/nitrogen>.
- Kristiansen, A. A. (mai 2022). *Tilstanden i Oslofjorden er alvorlig. Miljøministeren varsler krav om kloakkrensing*. URL: <https://www.aftenposten.no/oslo/i/G3EA71/tilstanden-i-oslofjorden-er-alvorlig-miljoeministeren-varsler-krav-om-kloakkrensing>.
- LCA.no (2023). *Hva er LCA?* URL: <https://lca.no/hva-er-lca/>.
- Lea, R. (2022). Biological nitrogen removal in recirculating aquaculture systems (RAS): Adaptation of a biological treatment process based on partial nitrification and anammox to RAS conditions. PhD-avhandling. Institutt for bioteknologi og matvitenskap. URL: <https://hdl.handle.net/11250/3013353>.
- Lovdata (jan. 2023). Forskrift om begrensning av forurensning (forurensningsforskriften). URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931>.
- Lyngstad, E. (apr. 2023). *Norsk Vanns høringsinnspill til Miljødirektoratet og EU om EUs forslag til revidert avløpsdirektiv*. Tekn. rapp.: 7–11. URL: <https://norsk vann.no/wp-content/uploads/vannspeilet01-2023.pdf>.
- Miljødirektoratet (des. 2022a). *EU-direktiv om avløp revideres*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/fagmeldinger/2022/desember-2022/eu-direktiv-om-avlop-revideres/>.
- Miljødirektoratet (okt. 2022b). *Klimatilpasning i vann og avløpssektoren*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/for-myndigheter/klimatilpasning/klimatilpasning-i-sektorer/vann-og-avlop/>.
- Miljødirektoratet (jun. 2022c). *Miljødirektoratet opprettholder nitrogenfjerningskrav*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/nyheter/2022/juni-2022/miljodirektoratet-oppretholder-nitrogenfjerningskrav/>.
- Miljødirektoratet (nov. 2022d). *Oslofjorden: Tiltaksplan for bedre miljøtilstand*. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/vann-hav-og-kyst/vann-hav-kyst-forvaltning/oslofjorden/>.
- Miljødirektoratet (mar. 2023). *Hovedfunn i synteserapporten i sjette hovedrapport*.
- Miljødirektoratet (udatert). *Avløpsrensaneanlegg*.
- NHO (jan. 2020). *Bærekraftig utvikling blir viktigere for eiere, investorer og långivere*. URL: <https://www.nho.no/tema/energi-miljo-og-klima/artikler/bedriftene-ma-ogsaa-vare-barekraftige/>.
- Nordre Follo renseanlegg (NFRA) (udatert). *Flytskjema*. URL: <https://www.nfra.no/flytskjema>.
- Norsk Vann (okt. 2022). *Forslag til nytt avløpsdirektiv lagt frem*. URL: <https://norsk vann.no/forslag-til-nytt-avlopsdirektiv-lagt-frem/>.
- Norsk Vann (mai 2023a). *Endogen respirasjon*. URL: <https://kurs.norsk vann.no/mod/glossary/showentry.php?eid=832>.
- Norsk Vann (2023b). *Fremmedvann*. URL: <https://norsk vann.no/ledningsnett-og-teknologi/fremmedvann/>.
- NRVA IKS (udatert). *Renseprosess*. URL: <http://www.nrva.no/avlop/renseprosess>.
- Regjeringen (apr. 2023). Revisjon av avløpsdirektivet. URL: [Revisjon%20av%20avl%C3%B8psdirektivet](https://www.regjeringen.no/no/tema/energi-miljo-og-klima/artikler/bedriftene-ma-ogsaa-vare-barekraftige/).

- FN-SAMBANDET (mar. 2023). *Klimaendringer*. URL: <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>.
- FN-Sambandet (apr. 2023). *FNs Bærekraftsmål*. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>.
- Smith, R., Peters, C. og Inomata, H. (2013). Systems, devices and processes. *Supercritical Fluid Science and Technology* 4: 55–119. DOI: [10.1016/B978-0-444-52215-3.00002-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52215-3.00002-7).
- Statsforvalteren i Innlandet (okt. 2022). *Slambehandling*. URL: <https://www.statsforvalteren.no/innlandet/miljo-og-klima/forurensning/slambehandling/>.
- Strous, M., Heijnen, J., Kuenen, J. G. og Jetten, M. (nov. 1998). *The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms*. Tekn. rapp. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s002530051340>.
- Strous, M., Kuenen, J. G. og Jetten, M. S. M. (jul. 1999). *Key Physiology of Anaerobic Ammonium Oxidation*. Tekn. rapp. URL: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/AEM.65.7.3248-3250.1999>.
- Staalstrøm, A., Walday, M., Vogelsang, C., Frigstad, H., Borgersen, G., Albretsen, J. og Naustvoll, L.-J. (mar. 2022). *Utredning av behovet for å redusere tilførslene av nitrogen til Ytre Oslofjord*. Tekn. rapp. NIVA (Norsk institutt for vannforskning). URL: <https://hdl.handle.net/11250/2762810>.
- Szatkowska, B. og Paulsrud, B. (feb. 2014). *The Anammox process for nitrogen removal from wastewater – achievements and future challenges*. Tekn. rapp. Vannforeningen. URL: https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/2014_902654.pdf.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G. og Pfrang, W. (2014). *Fundamentals of Biological Treatment. I: Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. Fifth Edition. Bd. 1. McGraw-Hill Education. Kap. 7: 555–684.
- Thorsnæs, G. (des. 2021). *Oslofjorden*. URL: <https://snl.no/Oslofjorden>.
- Trela, J., Malovanyy, A., Yang, J., Plaza, E., Trojanowicz, K., Sultana, R., Wilén, B.-M., Persson, F. og Baresel, C. (okt. 2014). *Deammonification Synthesis report 2014*. Tekn. rapp. URL: <https://sjostad.ivl.se/download/18.36f3359214d517c6a58680/1432649403325/B2210+Synthesis+report+2014.pdf>.
- Tsui, H. (jan. 2023). *Befaring på Bekkelaget renseanlegg*.
- Universitetet i Oslo (udatert). *Nitrogen*. URL: <https://www.periodesystemet.no/grunnstoffer/nitrogen/index.html#vrtx-periodic-table-element-chemistry>.
- Vannportalen (udatert). *Vanndirektivet*. URL: <https://www.vannportalen.no/regelverk-og-foringer/vanndirektivet/>.
- WRF (The Water Research Foundation). (mar. 2019). *Deammonification*. Tekn. rapp. from the Nutrient Removal Challenge. URL: <https://www.waterrf.org/sites/default/files/file/2022-09/Deammonification.pdf>.
- Zuo, F., Yue, W., Gui, S., Sui, Q. og Wei, Y. (apr. 2023). Resilience of anammox application from sidestream to mainstream: A combined system coupling denitrification, partial nitrification and partial denitrification with anammox. *Bioresource Technology*. DOI: [10.1016/j.BIORTECH.2023.128783](https://doi.org/10.1016/j.BIORTECH.2023.128783).
- Ødegaard, H. (1992). *Forskningsprogram for fjerning av næringsstoffer fra avløpsvann (FAN-programmet)*. Tekn. rapp. Vannforeningen. URL: https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/1992_31178.pdf.
- Ødegaard, H. (2014). *Vann- og avløpsteknikk*. 2. Norsk Vann: 104–563.

- Ødegaard, H. (2018). Chapter 3: MBBR and IFAS systems. I: red. av H. Ødegaard, G. Mannina og G. Olsson. IWA Publishing. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2595641/%25C3%2598degaard%252C%2bH.%2bChapter%2b3%2bin%2bMannina%2bet%2bal%2b%25282018%2529%2b-%2bIWA%2bPublishing.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- Ødegaard, H. (mar. 2022). *Fjerning av nitrogen i avløpsvann Med hovedvekt på nitrifikasjon/denitrifikasjon i MBBR anlegg*. Tekn. rapp. URL: <https://va-kompetanse.no/wp-content/uploads/OdegaardFjerningNitrogen.pdf>.
- Aarnes, H. (aug. 2020). *Anaerob ammoniumoksidasjon*. URL: https://snl.no/anaerob_ammoniumoksidasjon.
- Aarnes, H. (mar. 2023). *Nitrogensyklus*. URL: <https://snl.no/nitrogensyklus>.

Vedlegg A. Data fra Pilotforsøk

Kommentar til vedlegg A: Verdiene som viser 0.01 er fordi måleinstrumentet viste "LO", som tilsvarer at det er under grenseverdien. Det er derfor skrevet inn 0.01. I tabellen er det kun tatt med dagene hvor det er målt verdier.

Dato	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	Tilsatt NH ₄ Cl (g)	Tilsatt Natriumbi- karbonat(g)	O ₂ (mg/L)	T	pH	Kommentar
Januar									
19.01.2023	0.627	88.5	3.4				19.5	7.8	Målt pH med kalibrert pH-måler
20.01.2023			13.1			8.25	16.1		
21.01.2023	1.517		18.5			9.55	14.9	6.5	Målt pH med pH-papir
22.01.2023	1.413	235	15.7			10.09	13.6	5.5	
23.01.2023						9.78	14.9	5.5	
24.01.2023				2.898		9.59	16.9		
25.01.2023	0.597	26.05				9.84	16.6	5.5	
26.01.2023						9.84	15.7		Målt før tilsetning av nitritt.
27.01.2023	0.153			3.163		9.24	15.7		
29.01.2023	0.13	2.1				9.13	16.6		
31.01.2023	0.053	0.967		3.5883		9.15	15.9		
Februar									
01.02.2023	0.01	0.6				9.35	16.2		Satt opp ny lufteløsning.
02.02.2023	0.01	0.75				9.61	14.8		
03.02.2023				5.486					
07.02.2023		0.7	16.5	6.070				6.5	Tilsatte NH ₄ Cl klokken 11.00, slo av luft og målte prøve klokken 13.15. Slo på luft igjen.
09.02.2023	0.153	0.93	31.3	5.073		9.87	16.5	5.5	Tilsatte NH ₄ Cl, slo av luftingen i ti minutter.
10.02.2023				7.13					
15.02.2023				5.646		9.23	16.8	6.5	
16.02.2023				6.304		8.95	16.9	6.5	
20.02.2023	0.01	2.366	26.333	7.126		8.7	17.3	5.5	
21.02.2023	0.01	1.9	22.5			8.9	17.4	5.5	
22.02.2023	0.01	1.75	21.5					5.5	
23.02.2023	0.01	1.43		7.848					Tilsatte 1 liter med vann

Dato	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	Tilsatt NH ₄ Cl (g)	Tilsatt Natriumbi- karbonat(g)	O ₂ (mg/L)	T	pH	Kommentar
24.02.2023	0.01	1		6.547		8.87	17.8	5.5	
27.02.2023	0.01	0.6	26	7.251	1.171			5.5	
28.02.2023	0.01	0.53	26	7.613		9.61	16.0	7.5	Prøvene viste lave verdier, av pH-verdi på nesten 2, så det ble tilsatt 2 milliliter med lut. Prøver senere viste at det muligens var en feil med utstyret og at det ikke var rent nok.
Mars									
01.03.2023				6.697		9.61	16.0		
03.03.2023	0.01	0.53	12.3	6.671					
07.03.2023	0.01	0.36	121	8.048		8.93	16.4	5.5	
09.03.2023	0.04	0.05	135			9.34	16.4	5.5	
10.03.2023	0.205	0.47	16.7	6.152		9.21	13.3	5.5	Tilsatte og slo av luften fra 09.25-14.00, denne dagen.
10.03.2023				6.903	1.731				Tappet omtrent 1.5 desiliter fra reaktor, tilsatte 1,5 desiliter igjen. Tilsatte i etterkant.
11.03.2023	0.01	0.195	13.5	9.253	2.003	9.28	15.4	6.5	
20.03.2023	0.01	0.07	3.0	5.581		9.19	16.8	6.5	Prøve tatt ti minutter etter tilsatt ammoniumklorid.
21.03.2023	0.01	0.065	7.3	8.237					Tilsatte 1 liter med vann.
27.03.2023	0.01	0.04	3.0000	7.713		9.74	15		

Vedlegg B. Analysemetodene

Supelco
Quality Control Products

Analytical Procedures Appendices

Spectroquant® Prove
Spectrophotometer 600



Ammonium

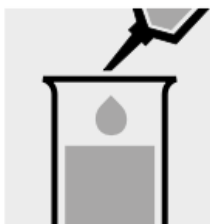
114752

Test

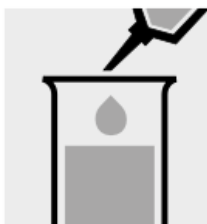
Measuring	0.05 – 3.00 mg/l NH ₄ -N	0.06 – 3.86 mg/l NH ₄	10-mm cell
range:	0.03 – 1.50 mg/l NH ₄ -N	0.04 – 1.93 mg/l NH ₄	20-mm cell
	0.010 – 0.500 mg/l NH ₄ -N	0.013 – 0.644 mg/l NH ₄	50-mm cell
	0.05 – 3.00 mg/l NH ₃ -N	0.06 – 3.65 mg/l NH ₃	10-mm cell
	0.03 – 1.50 mg/l NH ₃ -N	0.04 – 1.82 mg/l NH ₃	20-mm cell
	0.010 – 0.500 mg/l NH ₃ -N	0.016 – 0.608 mg/l NH ₃	50-mm cell
Expression of results also possible in mmol/l.			



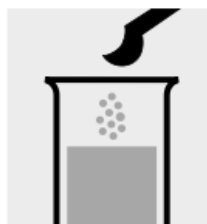
Check the pH of the sample, specified range: pH 4 – 13.
If required, add dilute sodium hydroxide solution or sulfuric acid drop by drop to adjust the pH.



Pipette 5.0 ml of the sample into a test tube.



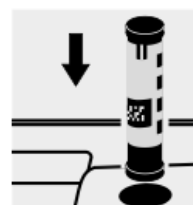
Add 0.60 ml of NH₄-1 with pipette and mix.



Add 1 level blue microspoon of NH₄-2.



Shake vigorously to dissolve the solid substance.



Nitrite

114776
Test

Measuring range:	0.02 – 1.00 mg/l NO ₂ -N	0.07 – 3.28 mg/l NO ₂	10-mm cell
	0.010 – 0.500 mg/l NO ₂ -N	0.03 – 1.64 mg/l NO ₂	20-mm cell
	0.002 – 0.200 mg/l NO ₂ -N	0.007 – 0.657 mg/l NO ₂	50-mm cell

Expression of results also possible in mmol/l.



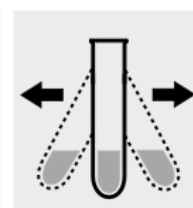
Check the pH of the sample, specified range: pH 2 – 10.
If required, add dilute sulfuric acid drop by drop to adjust the pH.



Pipette 5.0 ml of the sample into a test tube.



Add 1 level blue micro-spoon of NO₂-1.



Shake vigorously to dissolve the solid substance.



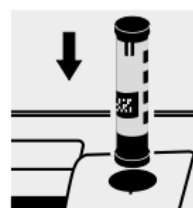
Check the pH, specified range: pH 2.0 – 2.5.
If required, add dilute sodium hydroxide solution or sulfuric acid drop by drop to adjust the pH.



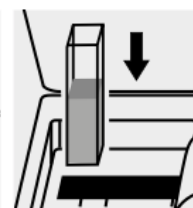
Reaction time:
10 minutes



Transfer the solution into a corresponding cell.



Select method with AutoSelector.



Place the cell into the cell compartment.

Important:

To measure in the 50-mm cell, the sample volume and the volume of the reagents have to be doubled for each. Alternatively, the semi-microcell, Cat.No. 173502, can be used.

Quality assurance:

To check the measurement system (test reagents, measurement device, and handling) ready-to-use nitrite standard solution Certipur®, Cat.No. 119899, concentration 1000 mg/l NO₂, can be used after diluting accordingly as well as the Standard solutions for photometric applications, CRM, Cat.Nos. 125041 and 133021.

Nitrate

109713

Test

Measuring range:	1.0 – 25.0 mg/l NO ₃ -N	4.4 – 110.7 mg/l NO ₃	10-mm cell
	0.5 – 12.5 mg/l NO ₃ -N	2.2 – 55.3 mg/l NO ₃	20-mm cell
	0.10 – 5.00 mg/l NO ₃ -N	0.4 – 22.1 mg/l NO ₃	50-mm cell
Expression of results also possible in mmol/l.			



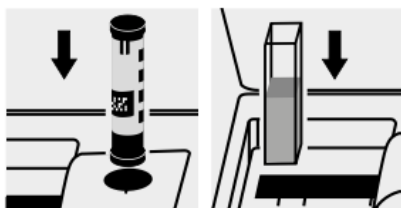
Pipette 4.0 ml of **NO₃-1** into a dry empty round cell (Empty cells, Cat. No. 114724).

Add 0.50 ml of the sample with pipette, **do not mix**.

Add 0.50 ml of **NO₃-2** with pipette, close the cell with the screw cap, and mix. **Caution, cell becomes hot!**

Reaction time: 10 minutes

Transfer the solution into a corresponding rectangular cell.



Select method with AutoSelector.

Place the cell into the cell compartment.

Important:

To measure in the 50-mm cell, the sample volume and the volume of the reagents have to be doubled for each. Alternatively, the semi-microcell, Cat.No. 173502, can be used.

Note:

Empty cells with screw caps, Cat.No. 114724 are recommended for the preparation. These cells can be sealed with the screw caps, thus enabling a hazard-free mixing of the sample.

Quality assurance:

To check the measurement system (test reagents, measurement device, and handling) we recommended to use Spectroquant® CombiCheck 10 and 20, Cat.Nos. 114676 and 114675, or the Standard solutions for photometric applications, CRM, Cat.Nos. 125036, 125037, 125038, 132240, 132241, and 132242.

Ready-to-use nitrate standard solution Certipur®, Cat.No. 119811, concentration 1000 mg/l NO₃, can also be used after diluting accordingly.

To check for sample-dependent effects the use of addition solutions (e.g. in CombiCheck) is highly recommended.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway