

Delrapport 217509 – LCA MBR

Jämförande analys av miljöpåverkan för aktivslam- och MBR-process baserat på fullskaliga driftdata

Framtagen av Kristin Johansson & Christian Baresel, IVL Svenska Miljöinstitutet (IVL)

Innehållsförteckning

Delrapport 217509 – LCA MBR	1
Bakgrund.....	2
Mål och omfattning.....	2
Avgränsningar och antaganden	2
Metod och material.....	2
Inventeringsanalys	4
Elförbrukning uppdelad på olika processteg	5
Resultat.....	6
Per kubikmeter renat vatten	6
Per kg reducerat totalkväve	7
Per kg reducerat totalfosfor	8
Valet av elmix kan ha en betydande påverkan på klimatavtrycket	9
Klimatavtrycket för MBR baserat på driftsdata är lägre än designdata	10
Olika oxalsyror påverkar klimatavtrycket marginellt	11
Resultat från fler miljöpåverkanskategorier	12
Viktade LCA-resultat	13
Jämförelse med andra studier	14
Slutsatser	16
Referenser	17
Bilaga: Detaljerade resultat från fler miljöpåverkanskategorier.....	18

Bakgrund

En vanlig och ofta framlyft nackdel med membranbioreaktortekniken (MBR) är en högre resursanvändning, särskilt energi och kemikalier för membranrengöring, jämfört med konventionella aktivslamprocesser (CAS). Om detta vägs upp av bättre reningsprestanda är en central miljöfråga, inte minst mot bakgrund av ökade krav på minskad klimat- och miljöpåverkan som ställs på reningsverken. Trots den snabba utbyggnaden av MBR i Sverige och globalt saknas fortfarande fullskaliga jämförande miljöstudier. Befintliga studier bygger oftast på modellantaganden, små eller medelstora anläggningar eller fokuserar på enskilda delar snarare än den samlade driftpåverkan (t.ex. Banti et al., 2020; Bertanza et al., 2017). Denna delstudie bidrar genom att jämföra CAS och MBR i full skala med verkliga driftdata från samma avloppsvatten.

Mål och omfattning

Målen med studien är:

- Att analysera och jämföra klimatpåverkan och andra miljöpåverkanskategorier från avloppsrening genom en konventionell aktivslamprocess (CAS) och en membranbioreaktorprocess (MBR) samt,
- Att jämföra reningsprocessernas klimatpåverkan samt annan miljöpåverkan genom att använda olika funktionella enheter.

Syftet, eller funktionen, med reningsprocesserna kan beskrivas på olika sätt: till exempel omhändertagande av spillvatten, reduktion av näringsämnen eller olika föroreningar.

Avgränsningar och antaganden

- Vi använder schabloner för att beräkna utsläpp från recipienten (baserade på Svenskt Vattens klimatberäkningsverktyg; se mer i metodbeskrivningen).
- Vi utgår från uppmätta värden för lustgas- och metanutsläpp från reningsverket Henriksdal men vi antar samma utsläppsfaktor för CAS som för MBR. MBR-specifika mätningar är på gång men är inte inkluderade i dagsläget.
- Vi räknar på att den el som används i processerna är en genomsnittlig svensk elmix (emissionsfaktor ca 47 g CO₂-ekvivalenter per kWh) men vi testar olika elmixar i en känslighetsanalys.

Emissionsfaktorerna för kemikalier är delvis leverantörsspecifika och delvis baserade på schabloner från LCA-databaser och från litteratur (se t.ex. Andersson et al., 2024).

Metod och material

För att bemöta mål och syfte har flera funktionella enheter använts för att utvärdera reningsteknikerna.

- 1 m³ renat vatten
- 1 kg reducerat kväve (N-tot)
- 1 kg reducerat fosfor (P-tot)

En ytterligare funktion med rening av avloppsvatten är att minska mängden partiklar eller suspenderade ämnen i utgående vatten. Den här funktionen har inte kvantifierats i denna analys på grund av svårigheter att jämföra inkommande och utgående mängder.

Systemgränserna för studien inkluderar hela vattenlinjen, från inkommande avloppsvatten och försedimentering till utsläpp av renat avloppsvatten till recipient. För hela vattenlinjen inkluderas all betydande energiförbrukning, tillverkning av kemikalier samt utsläpp till luft.

Slamhanteringen är exkluderad eftersom slammet blandas idag och data respektive resursbehov för slamhantering för respektive teknik finns således inte. Dessutom bedöms klimatpåverkan från slamhantering bidra lika mycket till de två reningsteknikerna och därmed inte påverka jämförelsen.

Miljöpåverkan från byggnation och tillverkning av kapitalvaror ligger utanför systemgränserna. Detta gäller även tillverkningen av membran. Detta då flera miljöpåverkansstudier för reningsverk och MBR-processer har visat att driftrelaterade miljöeffekter dominerar (till exempel Ioannou-Ttofa et al., 2016). Fokus i den här studien är därför på miljöpåverkan från enbart driften av dessa reningstekniker.

Studien bygger på uppmätta data för år 2024 för reningsverket Henriksdal (Stockholm vatten och avfall) och alla förbrukningstal och emissionsdata representerar ett årsmedelvärde. Data bygger på verklig drift för två olika linjer: MBR och CAS. Linjerna delar vissa processer, såsom grovrening och försedimentering, och data för dessa processer skiljer sig inte åt mellan MBR och CAS.

Den här studien fokuserar främst på att utvärdera reningsteknikernas bidrag till klimatpåverkan, uttryckt i kg koldioxidekvivalenter per funktionell enhet. Karakteriseringsfaktorer enligt IPCC AR6 (2021) har applicerats. Andra miljöpåverkanskategorier analyseras och utvärderas också, men i lägre detaljnivå.

I våra klimatberäkningar används schabloner för utsläpp från recipienten, baserade på Svenskt Vattens klimatberäkningsverktyg, där utsläpp av växthusgaser relateras till halter av kväve och COD i utgående vatten. Dessa schabloner har sin grund i IPCC:s metodik för beräkning av indirekta utsläpp från avloppsvatten (IPCC 2019). Emissionsfaktorerna är förknippade med betydande osäkerheter eftersom faktiska processer i recipienter beror på syrehalt, temperatur, hydraulik och sedimentförhållanden. Samtidigt gäller att osäkerheten är systematisk och lika för jämförda alternativ. Metoden är transparent, vedertagen och förankrad i internationell praxis, vilket gör den försvarbar i beslutsunderlag.

Inkludering av climateffekter i recipienten är ännu inte allmänt vedertaget i LCA för avloppsvattenrening, men valet att inkludera recipienten motiveras av reningsteknikernas varierande effektivitet att reducera näringsämnen och andra föroreningar. Att exkludera detta skulle bidra till en orättvis jämförelse. IPCC (2019) beskriver det som "good practice"

att inkludera utsläpp från recipienten och Ayres Rebello et al. (2021) rekommenderar att inkludera både utlopp samt påverkan på recipienten om teknikerna man jämför har olika reningseffektivitet.

Inventeringsanalys

I Tabell 1 presenteras de indata som använts vid beräkningen av klimatpåverkan från aktivslam-linjerna CAS respektive MBR på Henriksdals reningsverk. Uppmätta data är till stor del baserade på år 2024 och data anges per kubikmeter renat vatten.

Tabell 1. Inventeringsanalys för behandling av 1 m³ avloppsvatten i CAS respektive MBR processerna på Henriksdals reningsverk.

Teknisk data
 Reningsslag

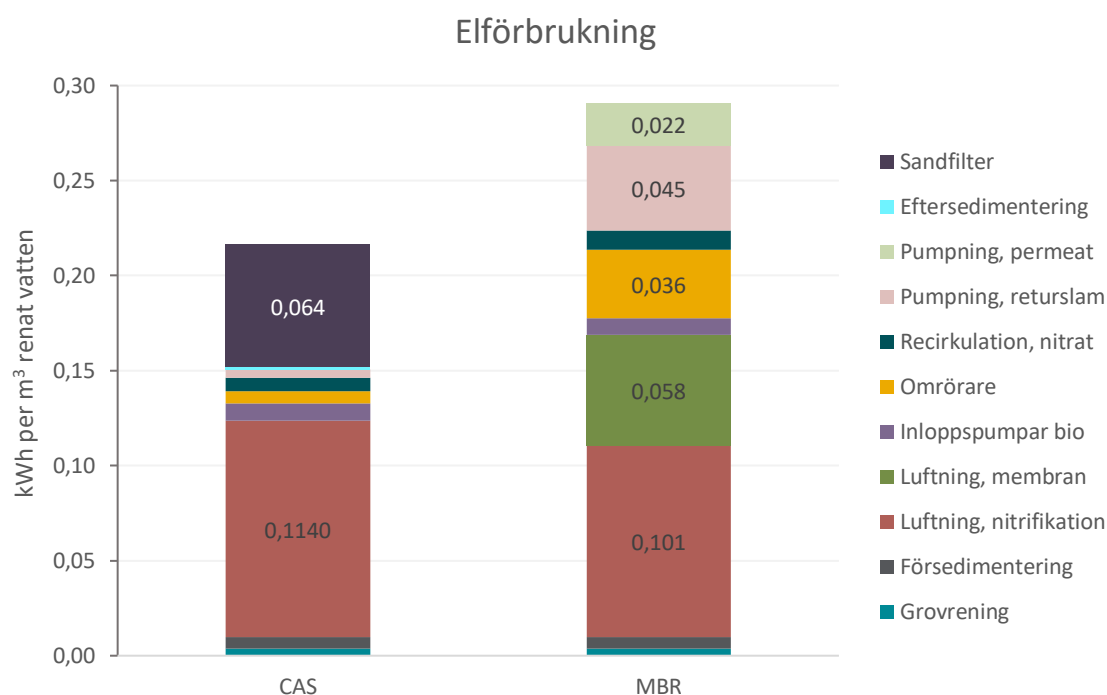
Aktivitet, resurs	Mängd		Enhet	Kommentar
	CAS	MBR		
Inflöden				
Järnsulfat (försed.)	62,5	62,5	g/m³	Mätning 2024
Järnsulfat (biosteg)	14	18	g/m³	Mätning 2024
Polyaluminiumklorid	3,33	3,33	g/m³	Mätning 2024
Oxalsyra (5,7%)		6,29	g/m³	Mätning 2024
Natriumhypoklorit (12%)		1,44	g/m³	Mätning 2024
El, grovrening och försedimentering	0,0097	0,0097	kWh/m³	Uppskattning (SVOA)
El, aktivslam	0,141		kWh/m³	Mätning 2024
El, eftersedimentering	0,0014		kWh/m³	Uppskattning (SVOA)
El, sandfilter	0,0643		kWh/m³	Uppskattning (SVOA)
El, MBR		0,281	kWh/m³	Mätning 2024
Emissioner, luft				
Lustgas (biologin)	0,264	0,264	g/m³	Mätning 2024
Metan (försedimentering och biologin)	0,803	0,803	g/m³	Mätning 2024
Lustgas (recipienten)	0,071	0,041	g/m³	Schablon*
Metan (recipienten)	0,23	0,08	g/m³	Schablon*
Emissioner, vatten				
P-tot	0,19	0,13	g/m³	Mätning 2024
Reducerat P-tot	4,68	4,74	g/m³	Beräkning (SVOA)
N-tot	8,83	5,18	g/m³	Mätning 2024
Reducerat N -tot	30,9	34,5	g/m³	Beräkning (SVOA)
BOD ₇	3,38	1,18	g/m³	Mätning 2024
Avfall				
Primärslam	70	70	g TS/m³	Uppskattning (SVOA)
Överskottsslam	69	92	g TSS/m³	Mätning 2024

*Från Svenskt Vattens klimatberäkningsverktyg (drift), baserat på faktorer från IPCC.

Av tabellen framgår att produktionen av överskottslam är högre i MBR-processen, vilket potentiellt kan påverka slamhanteringen på flera sätt. Å ena sidan kan en större slamvolym innebära ett ökat behov av energi och polymerer vid avvattning. Å andra sidan kan den ökade mängden slam även leda till en potentiellt högre biogasproduktion. Eftersom SVOA i nuläget, som tidigare nämnts, inte har någon separat slamhantering för de två processerna och någon karakterisering av de olika slamflödena ännu inte har genomförts, inkluderas inte slamhanteringen i beräkningarna. Detta planeras att följas upp i framtida studier.

Elförbrukning uppdelad på olika processteg

I Figur 1 nedan presenteras elförbrukningen för aktivslam- och MBR-processen uppdelat på de olika processtegen. Samtliga slamprocesser är exkluderade. Ingående data är baserat på mätningar från Henriksdals reningsverk och representerar årsmedelvärden för år 2024.



Figur 1. Fördelning av aktivslam- och MBR-processens elförbrukning uppdelade på olika processteg i reningsverket.

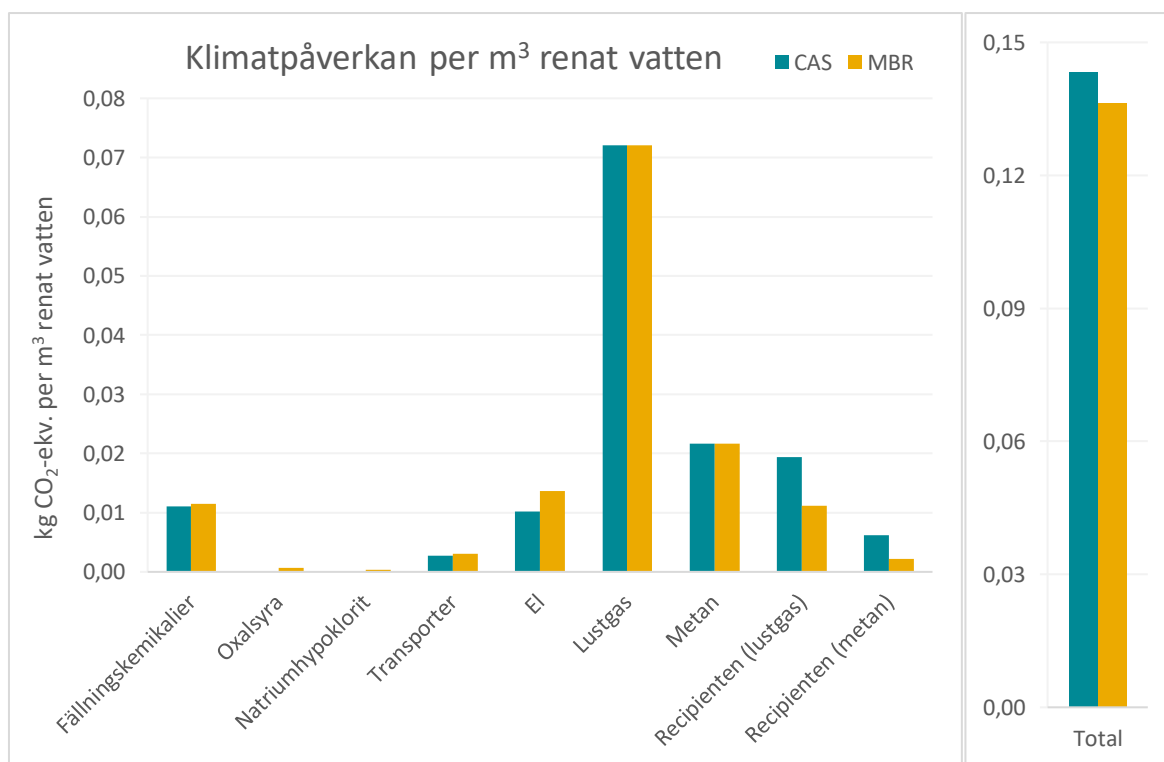
Resultat

I det här kapitlet presenteras klimatpåverkansresultaten från studien. De tre första delkapitlen innehåller resultaten uttryckta i tre olika funktionella enheter och de efterföljande kapitlen innehåller resultat från känslighetsanalyser:

- Byte av elmix
- Data baserat på drift vs design för MBR-processen
- Olika produktionssätt för oxalsyra

Per kubikmeter renat vatten

I figuren nedan presenteras klimatavtrycken för CAS och MBR-processen uttryckt per kubikmeter renat vatten och uppdelat på olika aktiviteter: produktion av kemikalier, deras transporter, produktion av el och slutligen utsläpp av lustgas och metan från processen samt från recipienten. Stapeln längst till höger representerar summan av alla ingående poster.



Figur 2. Klimatavtryck för CAS och MBR-processen uppdelat på olika kemikalier och utsläpp. Resultatet presenteras i enheten kg koldioxidekvivalenter per kubikmeter renat vatten.

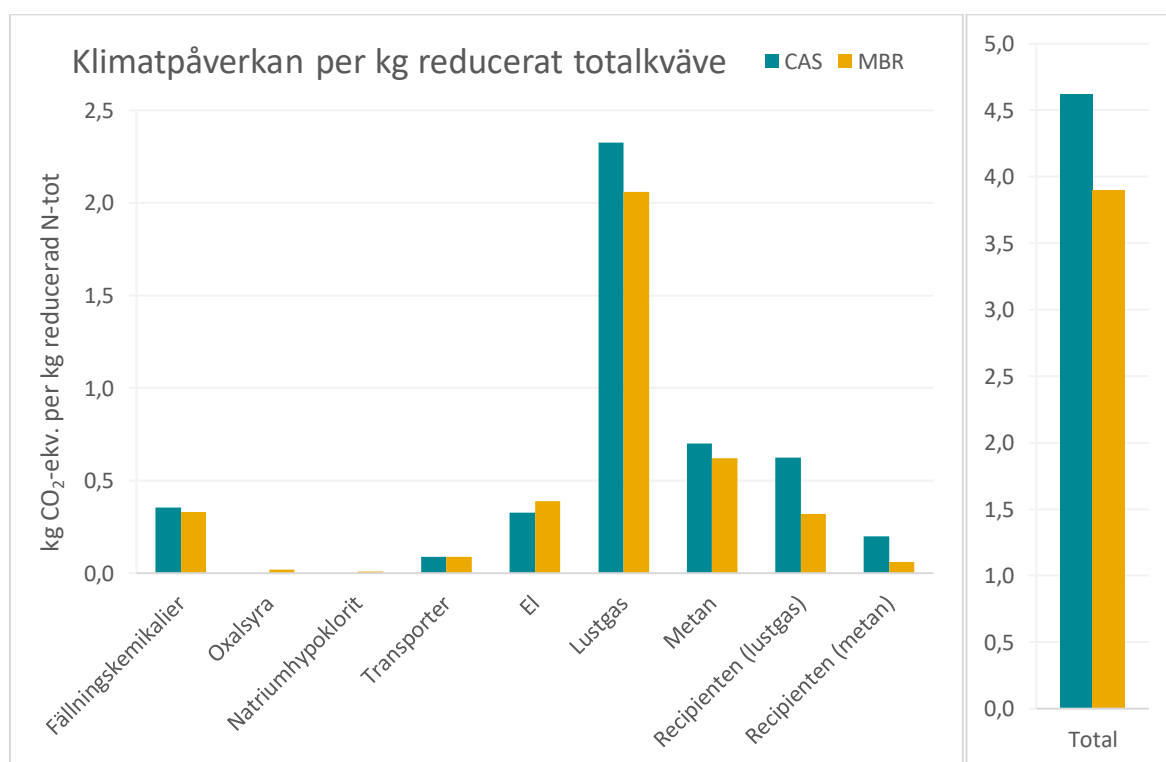
Utifrån resultaten presenterade ovan kan man till exempel se att det är lustgasutsläppen från biosteget som är den allra största posten (ca 50% av totala klimatpåverkan). Skillnaden i total klimatpåverkan mellan teknikerna är liten (motsvarar endast 5 %) och tack vare bättre kväverening i MBR har den tekniken något lägre total klimatpåverkan. Det finns i dagsläget inga platsspecifika lustgasmätningar för just MBR-processen och vi har antagit att utsläppen

är lika stora som för biosteget i aktivslamprocessen. Tidigare emissionsmätningar i MBR-piloten indikerade betydligt lägre direkta emissioner (Baresel et al., 2022). Om detta även gäller för fullskaleprocessen i Henriksdal återstår att se och planerade lustgasmätningar kommer kunna bidra till tydligare LCA-resultat i denna jämförelse.

Klimatpåverkan från elförbrukningen är markant högre för MBR även om eftersedimenteringen och sandfiltrering inte längre har något bidrag. Dessutom tillkommer påverkan från oxalsyra och natriumhypoklorit som behövs för membranunderhåll. Dessa bidrar dock endast marginellt till processens klimatpåverkan (Figur 2). Större skillnader går i stället att observera i utsläppen från recipienten som uppstår genom att lägre halter av kväve och BOD släpps ut per kubikmeter renat vatten för MBR-processen. Därmed uppstår potentiellt sett lägre utsläpp av lustgas och metan från recipienten. Det går att uppnå samma utsläppshalter med CAS som för MBR, men detta skulle kräva en högre energi- och kemikalieförbrukning.

Per kg reducerat totalkväve

I figuren nedan presenteras samma klimatavtryck för CAS och MBR-processen men uttryckt per kg reducerat kväve i stället för per kubikmeter.



Figur 3. Klimatavtryck för CAS och MBR-processen uppdelat på olika kemikalier och utsläpp. Resultatet presenteras i enheten kg koldioxidekvivalenter per kg reducerat kväve.

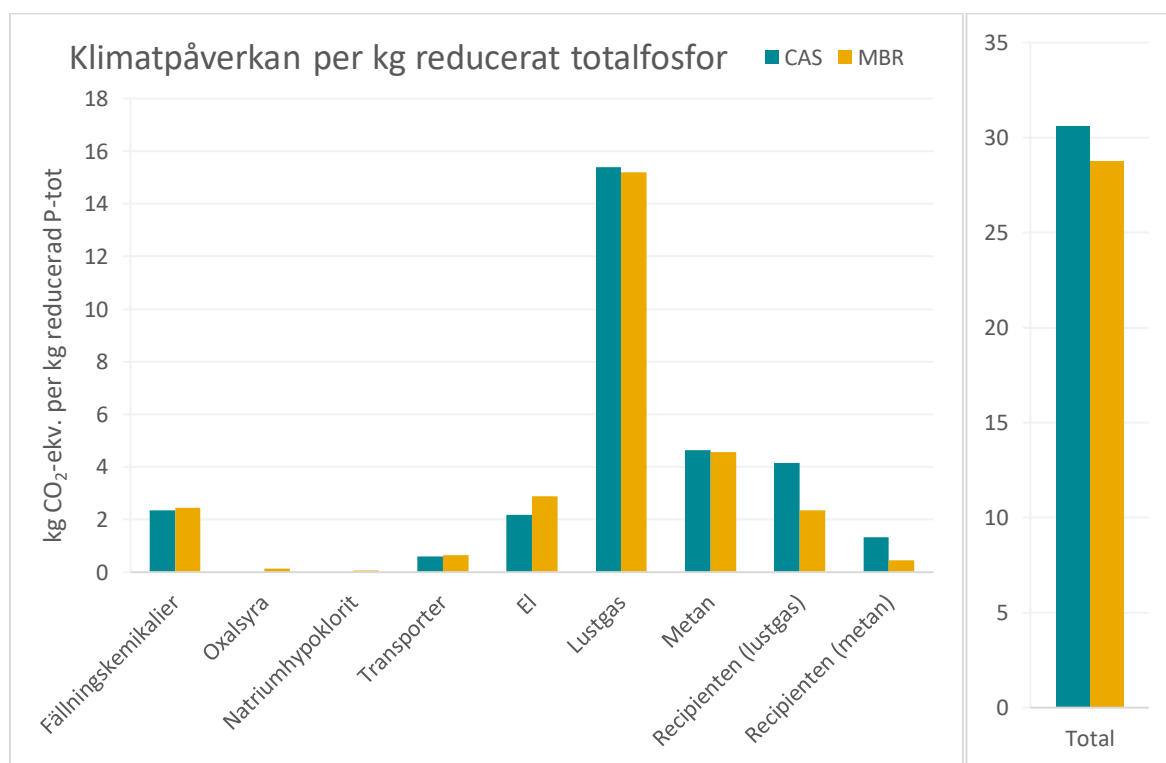
Jämfört med Figur 2 kan man uttyda större potentiella skillnader i klimatavtrycken mellan CAS och MBR-processen. Detta beror på att kvävekoncentrationen i utloppet från MBR-processen är lägre än för CAS (dvs MBR renar kväve till en högre grad).

De funktionella enheterna mäter olika funktioner med avloppsvattenrening och kan ge upphov till något olika resultat. Beroende på vad syftet med analysen är kan man alltså presentera olika resultat baserat på vilken av enheterna man tycker representera verkligheten bäst.

Noterbart här är att endast klimatpåverkan från elanvändning är högre per kg renat kväve för MBR jämfört med CAS. För alla andra jämförda källor och totalt sett har MBR lägre klimatpåverkan per kg N än CAS.

Per kg reducerat totalfosfor

I figuren nedan presenteras samma klimatavtryck för CAS och MBR-processen men uttryckt per kg reducerat fosfor i stället för per kubikmeter eller per kg reducerat kväve.



Figur 4. Klimatavtryck för CAS och MBR-processen uppdelat på olika kemikalier och utsläpp. Resultatet presenteras i enheten kg koldioxidekvivalenter per kg reducerat fosfor.

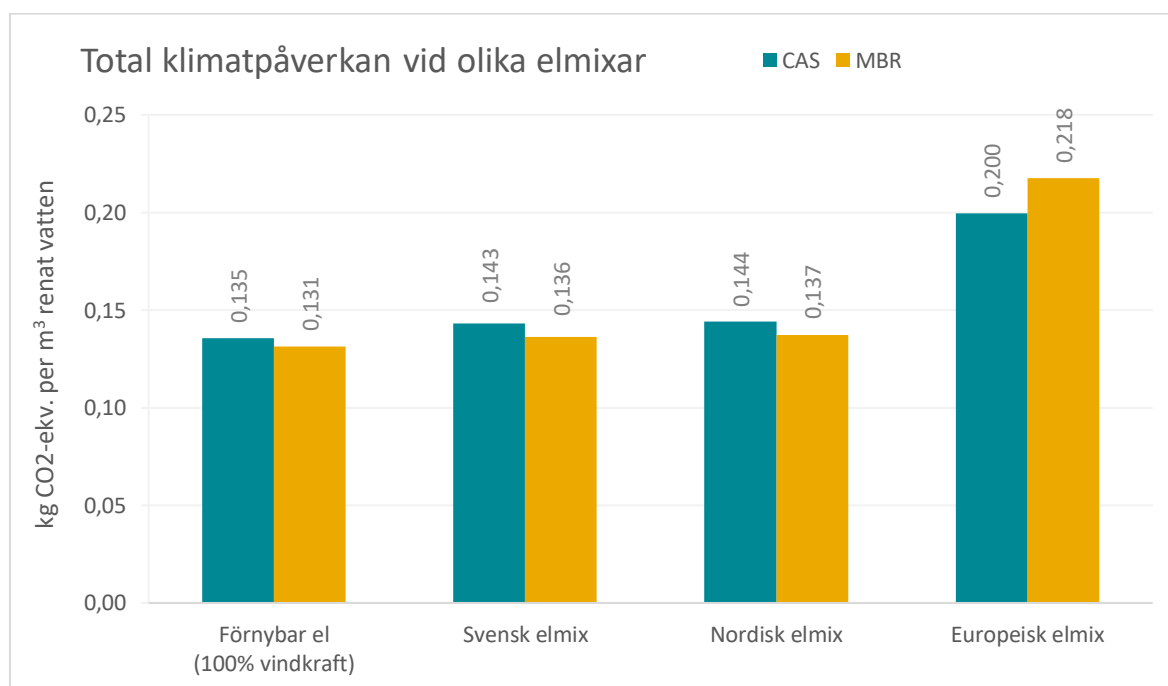
Jämfört med Figur 3 ovan kan man uttyda mindre skillnader mellan teknikerna om man uttrycker resultaten per kg reducerat fosfor, men MBR har fortfarande lägre klimatpåverkan per kg renat fosfor än CAS. Fosforkoncentrationen i utloppen är snarlika mellan CAS och

MBR vilket tyder på att de har en likvärdig prestation när det kommer till att reducera fosfor i inkommande avloppsvatten.

Valet av elmix kan ha en betydande påverkan på klimatavtrycket

I resultaten som presenterats hittills har vi utgått från att elen som driver processerna har producerats som en genomsnittlig svensk elmix som till stor del består av förnybara energikällor samt kärnkraft. Klimatavtrycket är generellt sett lågt i jämförelse med andra europeiska länder. För att kunna se hur valet av elmix påverkar resultaten testar vi olika mixar, resultaten presenteras i figuren nedan.

Eftersom SVOA använder den nordiska elmixen vid beräkning av organisationens klimatpåverkan har även denna inkluderats. Skillnader mellan svensk och nordisk elmix är dock försumbara.

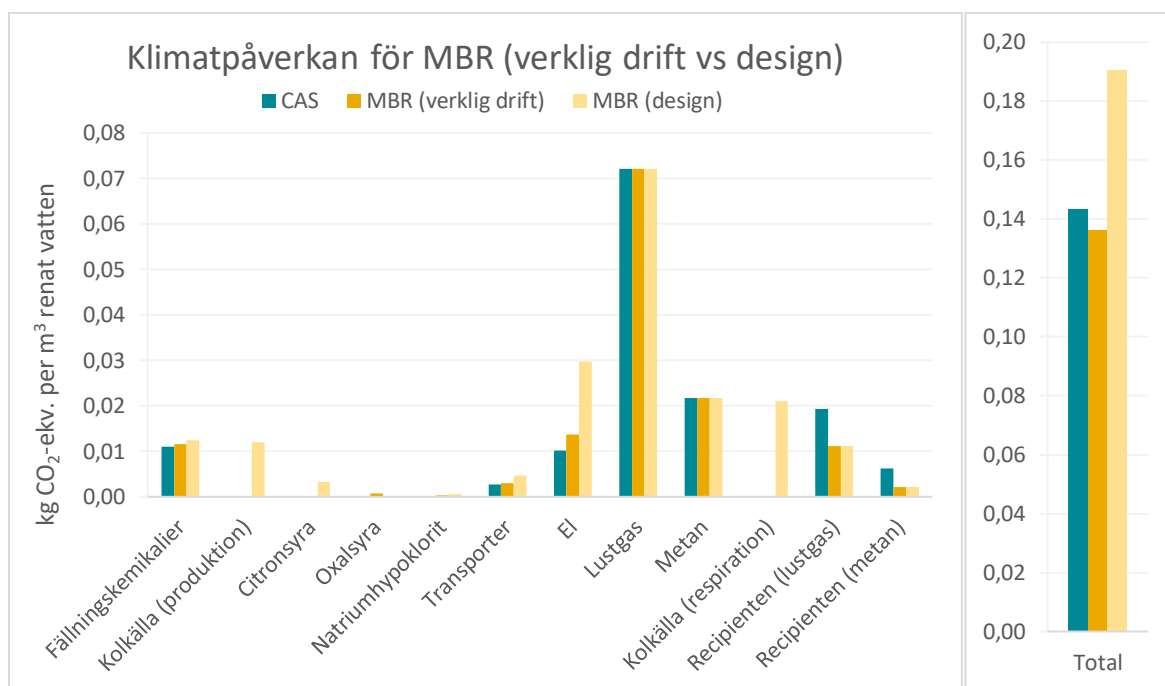


Figur 5. Skillnader i klimatavtryck mellan CAS och MBR där elmixarna har varierats (100% vindkraft, svensk, nordisk och europeisk elmix). Resultatet presenteras i enheten kg koldioxidekvivalenter per kubikmeter renat vatten.

De relativa skillnaderna är små om man jämför de tre första elmixarna och MBR-processen har ett något lägre klimatavtryck än CAS uttryckt per kubikmeter renat vatten. MBR-processen har dock fortfarande en högre elförbrukning per kubikmeter renat vatten än CAS. En intressant skillnad uppstår när vi testar en europeisk elmix som består av en större andel fossila bränslen: detta gör att MBR-processens klimatavtryck blir högre än CAS.

Klimatavtrycket för MBR baserat på driftsdata är lägre än designdata

Det finns stora skillnader i MBR-processens potentiella klimatpåverkan beroende på om man baserar utvärderingen på faktiska driftdata eller designdata. I den här analysen jämförs driftsdata från Henriksdal med ett designscenario för samma anläggning från SVU-rapport 2016–12 och tabeller B3-1 och B3-2 (Åmand et al., 2016). I figuren nedan presenteras de resulterande klimatavtrycken.



Figur 6. Skillnader i klimatavtryck mellan CAS och MBR-processen, där den senare representeras av två olika scenarier: data baserat på verklig drift hos SVOA samt data baserat på ett designscenario. Resultatet presenteras i enheten kg koldioxidekvivalenter per kubikmeter renat vatten.

De största skillnaderna mellan MBR-scenarier är att designen av processen antog en mycket högre elförbrukning för MBR-driften samt ett behov för tillsats av metanol som extern kolkälla (av fossilt ursprung) för kvävereningen. Skillnaderna i förbrukningen av syra för membrantvätt och natriumhypoklorit är relativt stora mellan design och den faktiska förbrukningen men den resulterande klimateffekten är marginell sett till det totala klimatavtrycket.

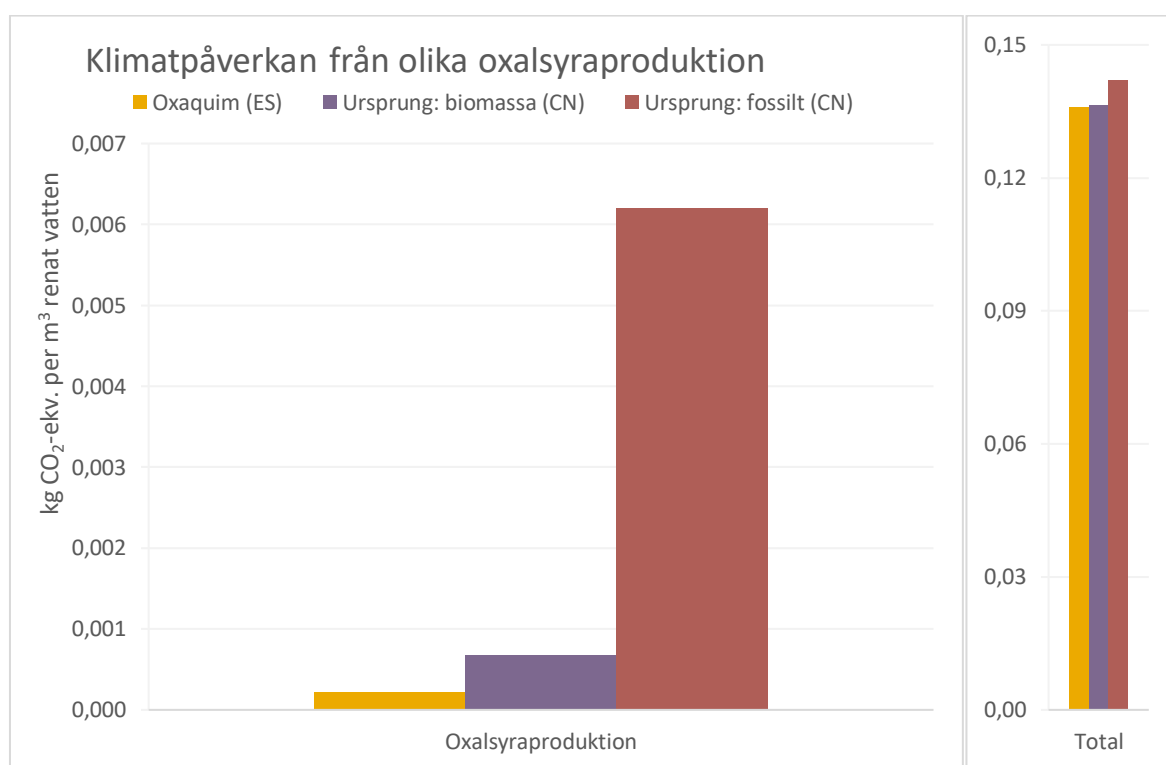
Resultaten visar liknande förhållanden även för de alternativa funktionella enheterna "per kg reducerat kväve" samt "per kg reducerat fosfor".

Detta exempel visar att felaktig eller otillräcklig kunskap om olika processer kan leda till en felaktig bedömning och val av reningsprocess. Figuren ovan visar att MBR-processen enligt design bedöms ha en betydligt högre klimatpåverkan än CAS-processen. I denna studie har potentiella utsläpp från recipienten inkluderats och det resulterar i att en mer effektiv

kvävereningsprocess ger upphov till lägre potentiella utsläpp av lustgas från recipienten. Skulle dessa utsläpp exkluderas, så som de ofta görs i tidigare LCA-studier, blir resultatet att MBR-processen presterar sämre än CAS.

Olika oxalsyror påverkar klimatavtrycket marginellt

Klimatavtrycket förändras marginellt beroende på vilken oxalsyra man köper in och det finns viktigare saker att fokusera på för att minska reningsprocessens klimatpåverkan. Detta trots att oxalsyra med olika ursprung har stor variation i klimatpåverkan. I figuren nedan presenteras resultatet för jämförelsen av olika oxalsyror.



Figur 7. Variation i MBR-processens klimatpåverkan där oxalsyrens tillverkningssätt är olika. Resultatet presenteras i enheten kg koldioxidekvivalenter per kubikmeter renat vatten.

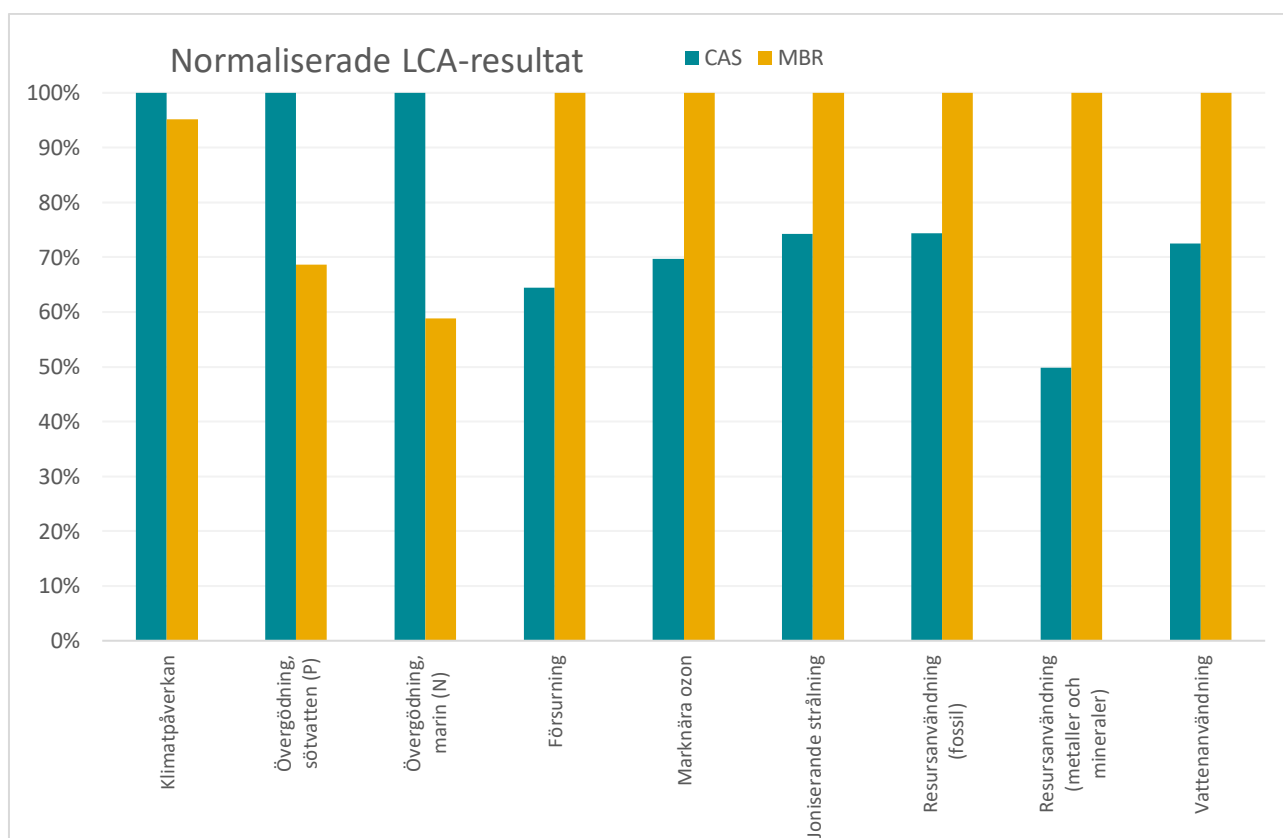
I den här analysen jämförs tre olika emissionsfaktorer:

- Oxalsyra producerat i Spanien av Oxaquim (leverantörsspecifik faktor),
- Oxalsyra producerat i Kina från biobaserade residualprodukter (schablon),
- Oxalsyra producerat i Kina från fossila råvaror (schablon).

Doseringen av oxalsyra baseras på driftsdata från Henriksdal. I grafen kan man inte se vilken klimateffekt man får av att optimera doseringen av oxalsyra jämfört med doseringsrekommendationer från membrantillverkare.

Resultat från fler miljöpåverkanskategorier

Mycket fokus läggs generellt på klimatpåverkan vid miljöbedömningar, men för att inte missa andra miljöeffekter behöver man inkludera fler miljöpåverkanskategorier i en LCA. I figuren nedan presenteras relativa resultat där miljöpåverkan för rening av en kubikmeter vatten jämförs för CAS- och MBR-linjerna. Analysen har utgått från LCIA-metoden EF 3.1 och ett urval har gjorts där mindre relevanta kategorier exkluderats, till exempel toxicitet, eftersom halter av metaller och organiska föroreningar i utloppet inte har kartlagts och därmed blir analysen inte fullständig. Detaljerade resultat för dessa miljöpåverkanskategorier visas i Figur 10 - Figur 17 i bilagan.



Figur 8. LCA-resultat för ett urval av miljöpåverkanskategorier där miljöpåverkan för rening av 1 kubikmeter vatten jämförs för CAS och MBR. Resultaten har normaliserats mot den processen med högst påverkan inom vardera kategorin.

Resultatet ovan indikerar att MBR-processen presterar bättre än CAS i tre kategorier: klimatpåverkan, övergödning i sötvatten där fosfor är det begränsande näringsämnet samt marin övergödning där kväve är begränsande. I övriga kategorier presterar CAS bättre. Dessa kategorier karaktäriseras av att de direkta utsläppen är av mindre betydelse medan kemikalie- och elförbrukningen blir av högre betydelse för processens miljöpåverkan. Detta blir till en nackdel för MBR-processen.

Viktade LCA-resultat

Normalisering och viktning av LCA-resultat är inte obligatoriska moment enligt ISO 14044, men resultatet från en viktning kan användas för att avgöra vilken eller vilka miljöpåverkanskategorier som är viktigast att ta hänsyn till. De viktningsfaktorer som används i denna studie visas i Tabell 2 och baseras på den europeiska metoden Environmental Footprint (EF) version 3.1, framtagen av Europeiska kommissionens Joint Research Centre (JRC). Metoden är resultatet av ett flerårigt vetenskapligt utvecklingsarbete och omfattande samråd med medlemsstater, forskare och intressenter inom industri och miljömyndigheter.

Viktningsfaktorerna i EF 3.1 bygger på en kombination av:

- Vetenskaplig kunskap om respektive miljöpåverkanskategoris relativa betydelse
- Bedömningar av skadans omfattning på människa och ekosystem
- Politiskt förankrade prioriteringar inom EU:s miljöpolitik

Det innebär att viktningsandelarna inte är godtyckligt satta i denna studie, utan är hämtade direkt från en etablerad och harmoniserad europeisk metodik. De representerar ett genomsnittligt europeiskt värderingsperspektiv och är avsedda att möjliggöra jämförbarhet mellan studier.

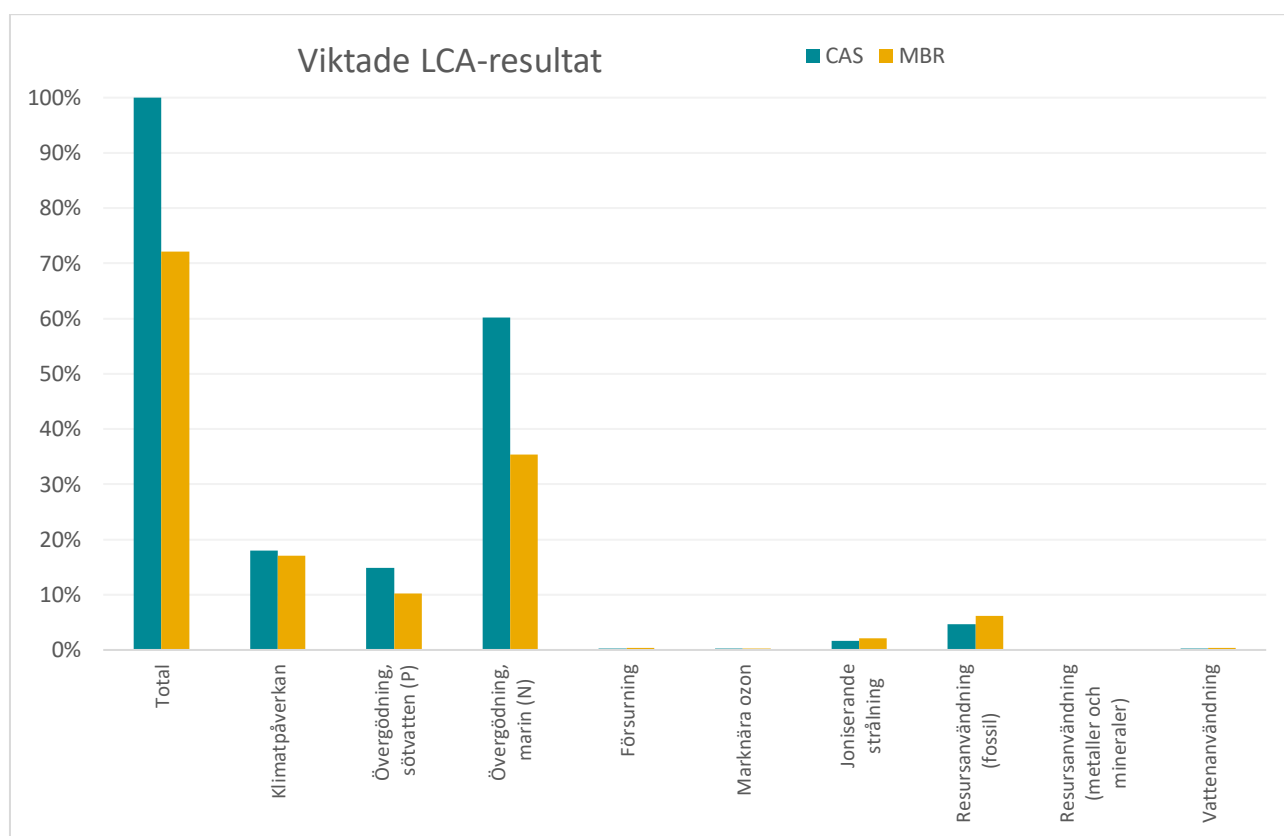
Viktning är enligt ISO 14044 ett frivilligt steg i en LCA eftersom det alltid innebär ett värderingsmoment. Resultaten ska därför tolkas som ett beslutsstöd snarare än en absolut rangordning. För att säkerställa transparens redovisas både oviktade resultat per miljöpåverkanskategori samt viktade resultat.

Notera även att summan av viktningsandelarna i Tabell 2 inte uppgår till 100 %, eftersom vissa kategorier (till exempel toxicitet och markanvändning) har exkluderats i denna studie på grund av brist på fullständiga data. De redovisade procentsatserna är dock oförändrade från EF 3.1 och har inte justerats eller omfördelats.

Tabell 2. Viktningsandelar enligt metoden EF 3.1 för kategorierna som inkluderats i denna studie. Notera att totalen inte uppgår till 100% då vissa kategorier exkluderats i denna studie.

Miljöpåverkanskategori	Viktning
Klimatpåverkan	21 %
Övergödning, sötvatten (P)	3 %
Övergödning, marin (N)	3 %
Försurning	6 %
Marknära ozon	5 %
Joniserande strålning	5 %
Resursanvändning (fossil)	8 %
Resursanvändning (metaller och mineraler)	8 %
Vattenanvändning	9 %

Viktningsresultaten presenteras i Figur 9 och indikerar att det kan vara övergödning, framför allt i termer av kväveutsläpp, som är viktigast att ta hänsyn till vid bedömning av dessa reningsprocessers miljöpåverkan. Klimatpåverkan och övergödning (fosfor) är också viktiga att ta hänsyn till, medan övriga kategorier har låga viktningspoäng. Utifrån dessa resultat kan man till exempel härleda att det är viktigare att bedöma en process möjlighet att reducera kväveutsläpp till recipienten snarare än en minskad klimatpåverkan.



Figur 9. Viktade LCA-resultat för den funktionella enheten per kubikmeter renat vatten. Resultaten presenteras i förhållande till den högsta sammanlagda poängen, totala resultatet för CAS i detta fall.

Jämförelse med andra studier

Bertanza et al. (2017) jämförde en MBR- och en CAS-process där inflödet var likadant, liksom i denna studie. Data för de olika processerna baserades på ett reningsverk i Italien. I studien inkluderades dock slamhanteringen, vilket gör att resultaten inte blir helt jämförbara med denna studie. Inom kategorin klimatpåverkan hade MBR-processen ett högre resultat än CAS. Detta berodde till stor del på elförbrukningen och att klimatpåverkan från elproduktionen hade en större relativ påverkan på totala resultatet än i denna studie. I Figur 5 ovan visas en känslighetsanalys med en europeisk elmix som kan ge en indikation till Bertanzas resultat.

Resultaten för övergödning varierar också, men dessa beror nästan enbart på de direkta utsläppen av kväve och fosfor i utloppet. Bertanza et al. (2017) anger halter på 0,6 samt 1,0 mg/l totalfosfor för CAS och MBR, medan uppnådda halter från Henriksdal är 0,19 samt 0,13 mg/l. För kvävet är halterna 9,7 samt 9,5 mg/l i Bertanza et al. (2017), medan uppnådda halter från Henriksdal är 8,8 samt 5,2 mg/l. Skillnaderna är därmed ganska stora och ger också upphov till olika övergödningspotentialer.

Heinonen (2023) jämförde också miljöpåverkan för en MBR- och en CAS-process, dock baserades indata på en litteraturstudie och olika antaganden. I studien uppnådde processerna samma utsläppskrav för kväve och fosfor och det fanns därmed ingen skillnad i effektivitet mellan processerna som i denna studie. Resultatet för övergödningspotentialen blev därmed snarlika mellan processerna.

Klimatpåverkan styrdes till stor del av direkta utsläpp av metan och lustgas (emissionsfaktorerna var baserade på IPCC, medan de var baserade på mätningar i denna studie), och resten bestod av utsläpp relaterade till konstruktion av anläggningarna och drift, där driftrelaterade utsläpp var större. MBR-processen hade liksom här en högre klimatpåverkan för el och kemikalier.

Slutsatser

Baserat på de presenterade resultaten kan följande slutsatser dras:

- Resultaten indikerar att MBR-processen har en lägre klimatpåverkan än CAS, oavsett val av funktionell enhet.
 - Klimatavtrycket är speciellt lågt om reduktion av kväve är funktionell enhet eftersom MBR-processen åstadkommer en högre kvävereduktion än CAS.
 - MBR-processen har en högre elförbrukning än CAS, men potentiella utsläpp av lustgas och metan från recipienten (från utsläpp av N och BOD i utloppet) leder till att MBR-processen gynnas.
- Ju lägre klimatpåverkan från elproduktionen desto bättre klimatavtryck för MBR-processen jämfört med CAS.
- En MBR-process baserad på verkliga driftsdata uppvisar ett lägre klimatavtryck än en process baserad på ett designscenario. Detta visar hur viktigt miljöpåverkansstudier som baseras på faktiska anläggningar är för att inte en skev bedömning av olika reningsprocesser görs p.g.a. fel antaganden.
- Valet av oxalsyra, med tanke på produktionssätt och produktionsland, påverkar det totala klimatavtrycket endast marginellt.
- Vid utvärdering av andra miljöpåverkanskategorier presterar MBR-processen bättre än CAS i kategorierna klimatpåverkan samt övergödning (både med avseende på kväve och fosfor). CAS-processen presterar bättre i kategorierna resursförbrukning, försurning, marknära ozon samt strålning.
- Genom att vikta resultaten indikeras att övergödning och klimatpåverkan är de viktigaste miljöpåverkanskategorierna att utvärdera vid rening av avloppsvatten, medan de övriga har låga viktningspoäng.

Utifrån dessa slutsatser kommer vi fram till några rekommendationer:

- Det är viktigt att utvärdera alternativa reningstekniker med kvalitetsorienterade funktionella enheter, inte enbart kvantitativa enheter.
- Det är viktigt att prioritera tillgången till förnybar el vid drift av en MBR-process.
- Det går att uppnå en lägre klimatpåverkan från driften av en MBR-process om man arbetar för en optimerad drift och ett minskat intervall av membrantvätt jämfört med ett designscenario.
- Det är viktigt att jobba för en optimerad förbrukning av oxalsyra och natriumhypoklorit vid membrantvätt, men det är inte dessa aktiviteter som bidrar mest till processens klimatavtryck: det är utsläpp av lustgas från biologin.
- Viktningen av LCA-resultaten indikerar att det är viktigt att ta hänsyn till processer som kan minska utsläpp av kväve och fosfor, likväl klimatpåverkan. Att enbart fokusera på en minskad klimatpåverkan kan göra att man missar andra miljöeffekter.

Referenser

Andersson, S. L., Baresel, C., Andersson, S., Westling, K., Eriksson, M., Carranza Munoz, A., Persson, G., Narongin-Fujikawa, M., Johansson, K., Rydberg, T. 2024. Chemical-saving potential for membrane bioreactor (MBR) processes based on long-term pilot trials. *Membranes* 2024, 14, 126. <https://doi.org/10.3390/membranes14060126>.

Ayres Rebello, T., Pereira Roque, R., Franci Goncalves, R., Luiz Calmon, J., Matos Queiroz, L. 2021. Life cycle assessment of urban wastewater treatment plants : a critical analysis and guideline proposal. *Water Science & Technology*, 83.3, 2021.

Banti, D.C., Tsangas, M., Samaras, P., & Zorpas, A. 2020. LCA of a Membrane Bioreactor Compared to Activated Sludge System for Municipal Wastewater Treatment. *Membranes* 10, 421. <https://doi.org/10.3390/membranes10120421>

Baresel, C., Yang, J., Bornold, N., Tjus, K., Kanders, L., Westling, K. 2022. Direct GHG emissions from a pilot scale MBR-process treating municipal wastewater. *Advances in Climate Change Research*, 13 (1), 138-145.

Bertanza, G., Canato, M., Laera, G., Vaccari, M., Svanström, M., Heimersson, S. 2017. A comparison between two full-scale MBR and CAS municipal wastewater treatment plants: techno-economic-environmental assessment. *Environ Sci Pollut Res* 24, 17383–17393. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9409-3>

Heinonen, E. 2023. Livscykelanalys av avloppsreningsverk - En jämförande studie mellan MBR och aktivslammetoden. Examensarbete inom samhällsbyggnad och miljöteknik. TRITA-ABE-MBT-2324, KTH, Stockholm.

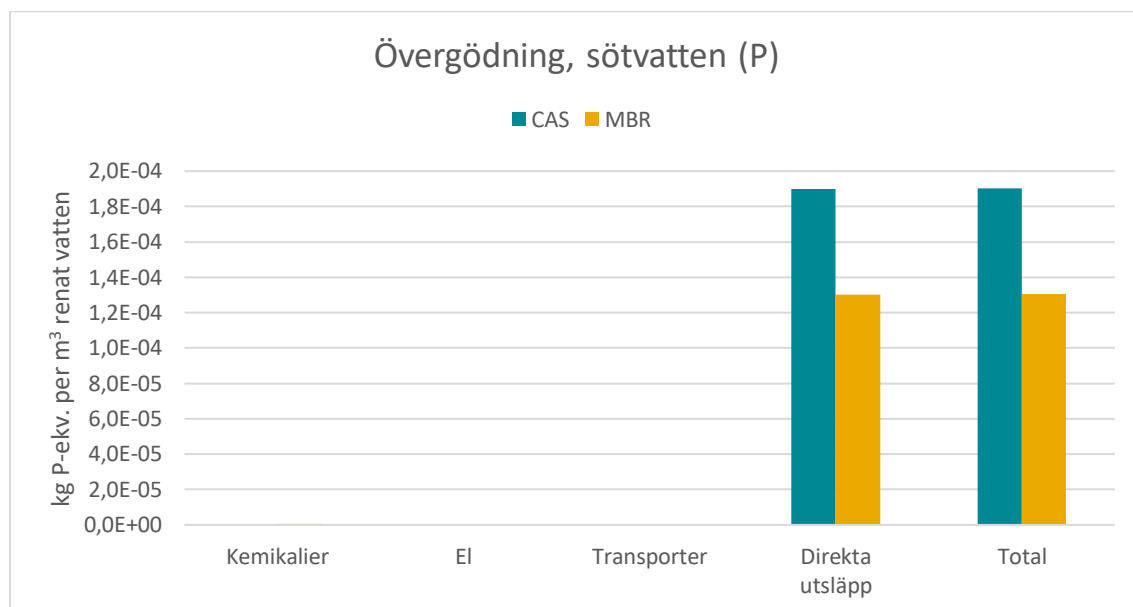
Ioannou-Ttofa, L., Foteinis, S., Chatzisyneon, E. & Fatta-Kassinos, D. 2016. The environmental footprint of a membrane bioreactor treatment process through life cycle analysis. *Sci Total Environ* 568:306–318.

IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge.

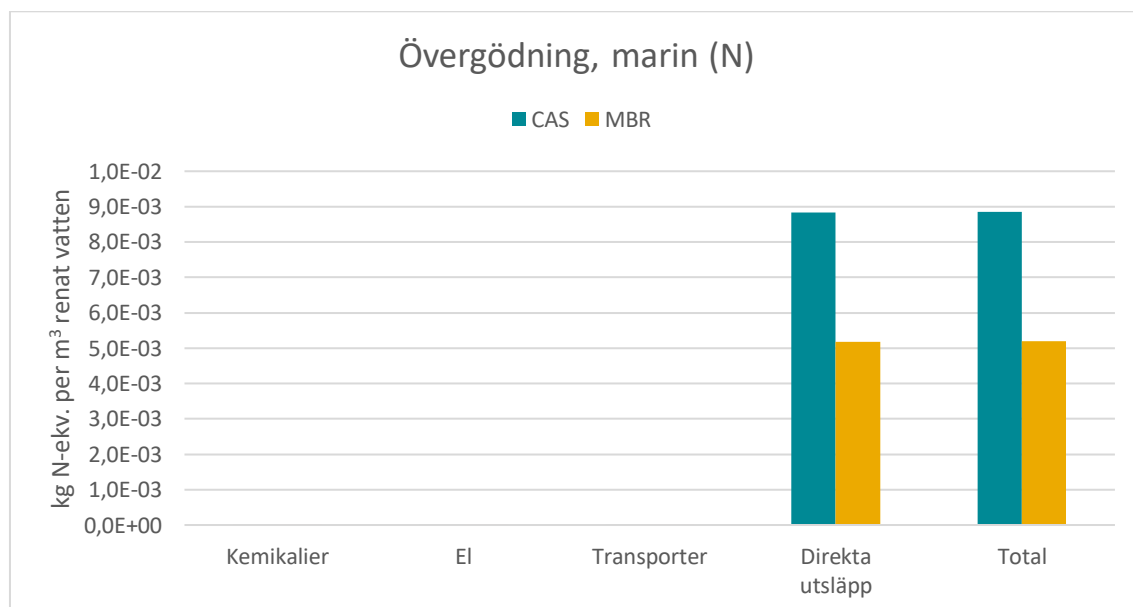
Volume 5: Waste, Chapter 6. Svenskt Vatten 2025. Klimatneutral VA. Tillgänglig: <https://www.svensktvatten.se/vara-sakomraden/klimat-och-hallbarhet/klimatneutral-va/>. Hämtad 2026-01-07.

Åmand, L., Andersson, S., Oliveira, F., Rahmberg, M., Arnell, M., Junestedt, C. (2016). Nya utsläppskrav för svenska reningsverk – effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan. SVU-rapport 2016–12.

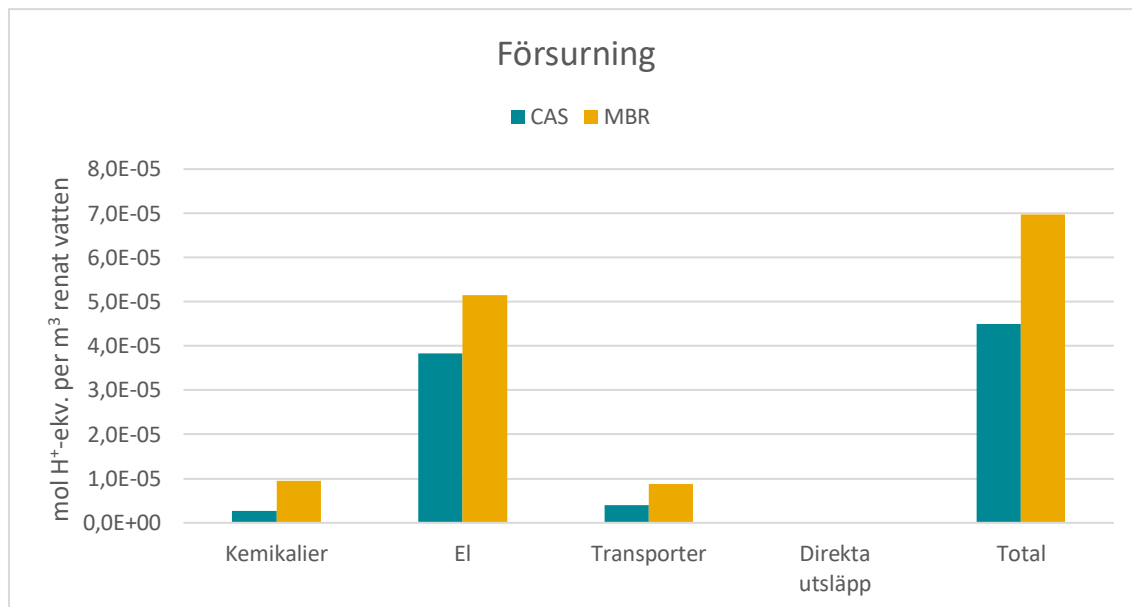
Bilaga: Detaljerade resultat från fler miljöpåverkanskategorier



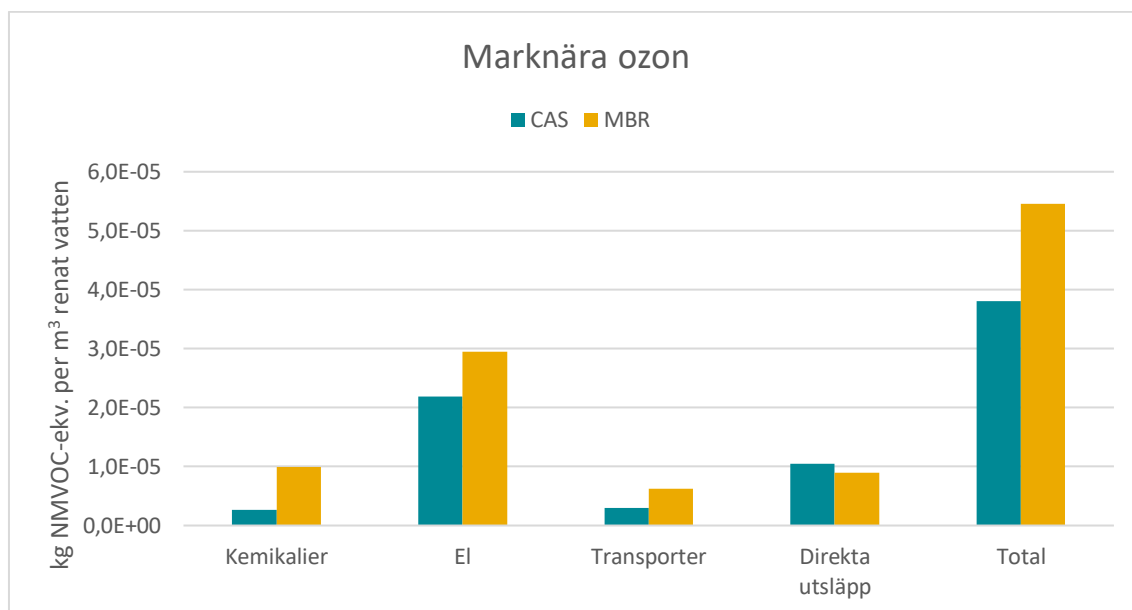
Figur 10. Övergödningspotential (P) för CAS- och MBR-processen. Resultatet uttrycks i kg fosforekvivalenter per kubikmeter renat vatten. Resultatet påverkas i stort sett enbart av de direkta utsläppen av fosfor till recipienten.



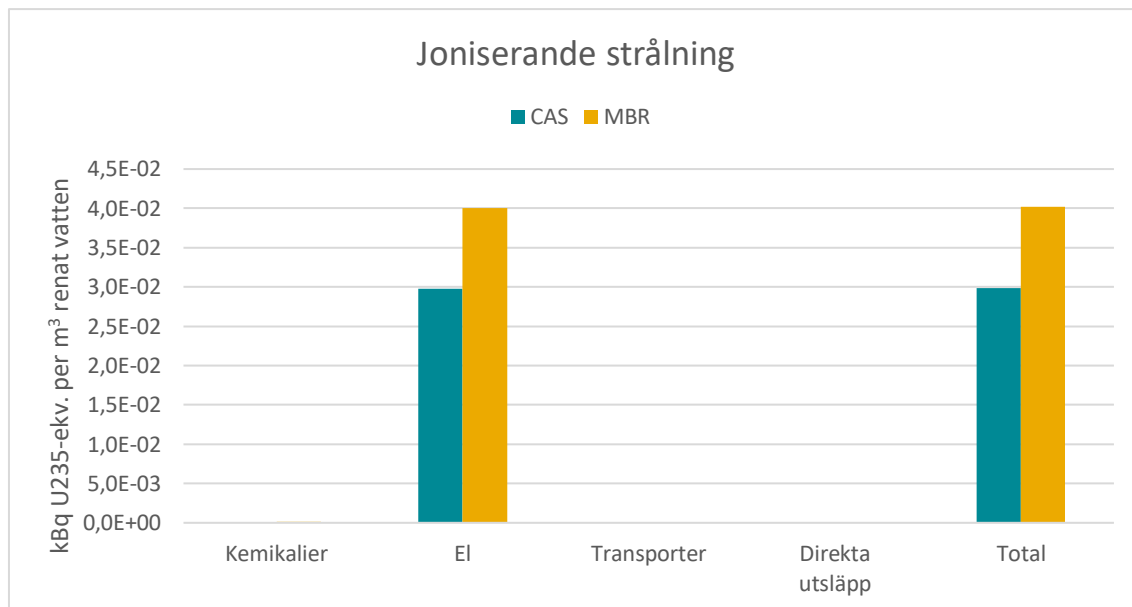
Figur 11. Övergödningspotential (N) för CAS- och MBR-processen. Resultatet uttrycks i kg kväveekvivalenter per kubikmeter renat vatten. Resultatet påverkas i stort sett enbart av de direkta utsläppen av kväve till recipienten.



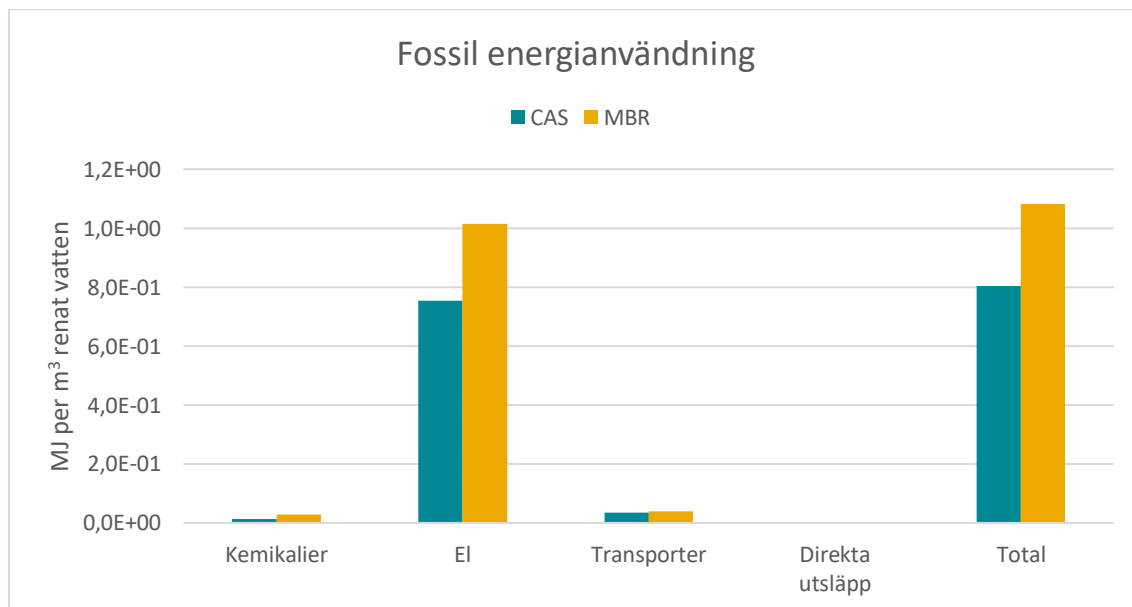
Figur 12. Försurningspotential för CAS- och MBR-processen. Resultatet uttrycks i mol H⁺-ekvivalenter per kubikmeter renat vatten. Resultatet påverkas till störst del av elförbrukningen.



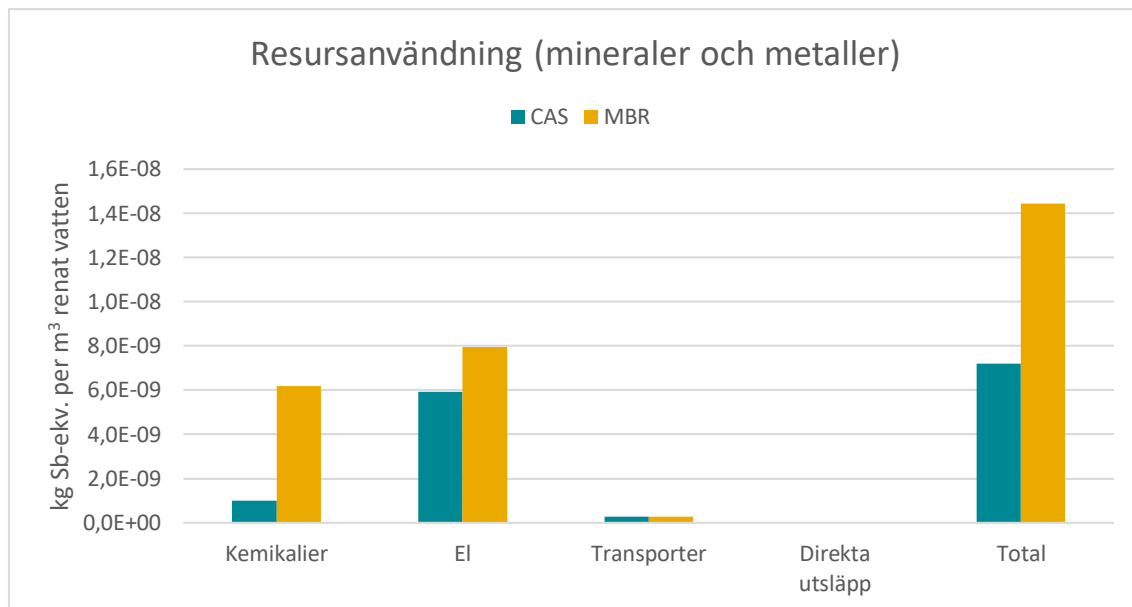
Figur 13. Bildningspotential för marknära ozon för CAS- och MBR-processen. Resultatet uttrycks i kg NMVOC-ekvivalenter per kubikmeter renat vatten. Resultatet påverkas till störst del av elförbrukningen men till viss del även av metanutsläpp från processerna.



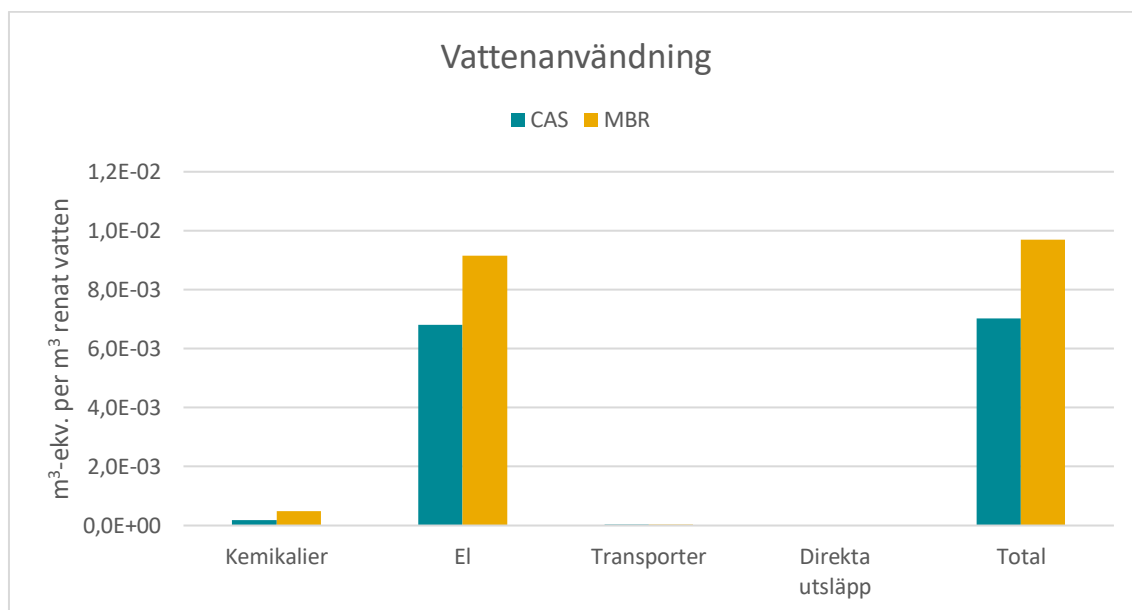
Figur 14. Potential för generation av joniserande strålning för CAS- och MBR-processen. Resultatet uttrycks i kBq U235-ekvivalenter per kubikmeter renat vatten. Resultatet påverkas i stort sett enbart av elförbrukningen. Elen representerar en svensk elmix som delvis produceras från kärnkraft.



Figur 15. Fossil energianvändning för CAS- och MBR-processen. Resultatet uttrycks i MJ per kubikmeter renat vatten. Resultatet påverkas till störst del av elförbrukningen.



Figur 16. Resursanvändningspotential för CAS- och MBR-processen. Resultatet uttrycks i kg Sb-ekvivalenter per kubikmeter renat vatten. Resultatet påverkas till stor del av el- och kemikalieförbrukningen.



Figur 17. Vattenförbrukningspotential för CAS- och MBR-processen. Resultatet uttrycks i kubikmeterekvivalenter per kubikmeter renat vatten, där en kubikmeterekvivalent påverkas av vilken typ av vattenresurs som förbrukas samt var i världen den förbrukas. Resultatet påverkas till störst del av elförbrukningen i denna analys.