

# Fra renseanlæg til ressourceanlæg

Fremtidens spildevandsbehandling har ikke kun fokus på at fjerne skadelige stoffer, men også på at der i spildevand er stoffer, der skal udnyttes. Spildevandet bliver i fremtiden til en ressource, der kan være grundlag for produktion af el og varme og nye råvarer. Hvordan fungerer et moderne dansk renseanlæg, og hvor er teknologien på vej hen?

PEDER HVID MARIBO

Fokus i rensning af byernes spildevand flytter sig, i takt med at viden om miljøskadelige effekter af spildevand bliver erkendt, og de politiske mål og prioriteringer udvikles. I disse år er der et paradigmeskift på vej, så man ikke kun fjerner potentielt skadelige stoffer fra spildevandet, men også ser spildevandet som en ressource, der skal udnyttes. I fremtiden skal spildevandsanlæg producere el og varme og sikre recirkulation af vigtige ressourcer, fx næringsstoffer til landbruget. Og organisk stof i spildevand kan danne baggrund for produktion af plastic og andre råvarer. Dette udfordrer branchen og skaber nye muligheder, der kræver omstilling. Ikke bare teknisk men også organisatorisk og strukturelt.

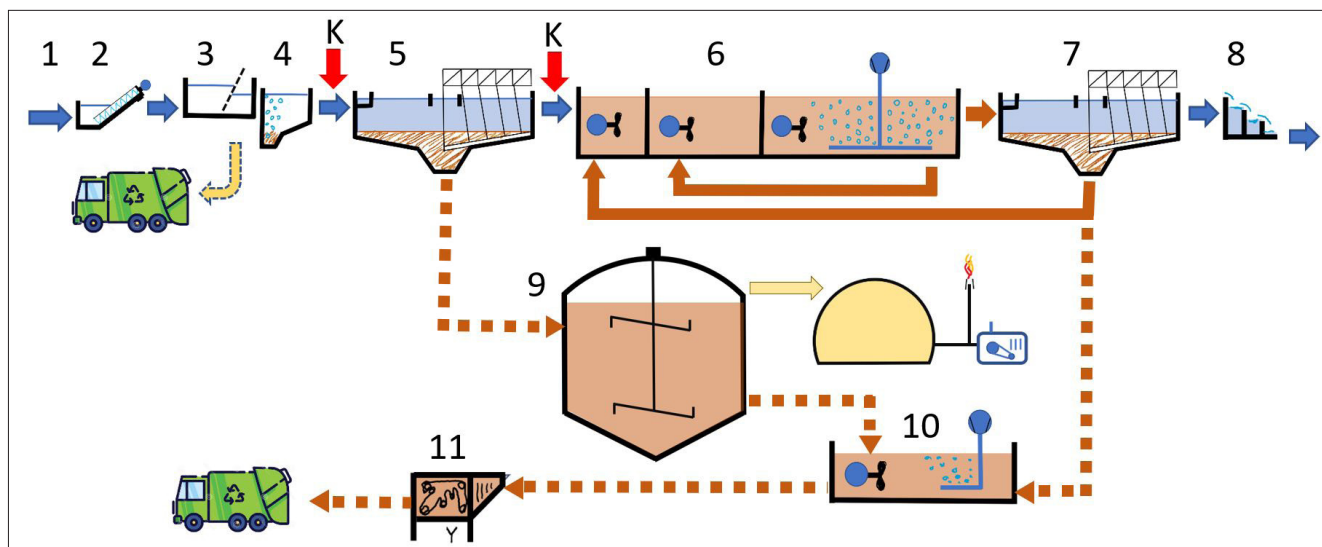
## Miljømæssige krav til spildevandsrensning

Lovgivningen kræver, at kommunerne sørger for infrastruktur til spildevandshåndtering, så man kan leve op til kravene om et godt vandmiljø, der er givet i Vandrammedirektivet /1/. Kommunalt ejede vandselskaber har ansvaret for at etablere og drive infrastrukturen, herunder byernes kloaksystemer og renseanlæg. Krav til spildevandsrensning har ændret sig gennem tiden. Risiko for spredning af sygdomsfremkaldende mikroorganismer er et af de tidligst erkendte problemer, og siden 1980'erne har der været stillet krav til fjernelse af iltforbrugende organisk stof (BI5) samt næringsstofferne kvælstof og fosfor, der bidrager til eutrofiering (algevækst og iltsvind) i vandmiljøet. Et nyt spildevandsdirektiv er på vej i EU. Det betyder, at energineutralitet og fjernelse af medicinrester og andre giftige

kemikalier fra spildevandet, vil blive et krav til fremtidens vandrensning.

## Aktiv-slam anlæggets grundprincipper

I Danmark er det overvejende anlæg baseret på aktiv-slam metoden med mekanisk, kemisk og biologisk rensning, der har vundet størst udbredelse til rensning af byernes spildevand (figur 1). Første trin er mekanisk rensning, hvor vandet passerer en rist, der fjerner genstande fra spildevandet (fx vatpinde, plastik og meget andet), og dernæst et sand- og fedtfang. Mekaniske rensning kan desuden omfatte fjernelse af partikler og organisk stof ved enten bundfældning eller filtrering. Herved kan 20 – 40 % (op til 60 %) af spildevandets indhold af organisk stof fjernes som primær slam. Primær slam er et produkt af spildevandsrensningen, der indeholder patogener og po-



Figur 1. Flowdiagram for aktiv-slam renseanlæg. 1: indløb. 2: pumpestation. 3: rist. 4: sand/fedtfang. 5: primær bundfældning. 6: aktiv slam tanke (procestanke, med recirkulation). 7: efterklaringsstank. 8: iltningstrappe. 9: Biogasanlæg. 10-11: slambehandling. K: kemikaliedosering.

**Box 1 – Nøgletermer i spildevandsrensning**

Term	Forklaring
Aktiv slam (eller bioslam)	En suppe af bakterier og andre organismer i anlæggets procestanke, der står for de biologiske renseprocesser.
Kemisk slam	Dannes ved tilsætning af jern- eller aluminiumsalte, fx ved reaktion med fosfor. Er biologisk inaktivt.
Primær slam	Partikler fjernet fra spildevandet før dette tilføres de biologiske procestanke. Har et højt indhold af let omsætteligt organisk stof.
Overskudsslam	Bioslam og kemisk slam, der løbende udtages til behandling og bortskaffelse for at holde en konstant koncentration af slam i procestankene. Behandlet primær slam er en del af overskudsslammet.
Nitrifikation	Biologisk iltning af $\text{NH}_4^+$ til $\text{NO}_3^-$ . Aerob proces.
Denitrifikation	Biologisk reduktion af $\text{NO}_3^-$ til $\text{N}_2$ under omsætning af organisk stof ( $\text{B}_5$ eller COD). Anoxisk proces.

tentielt miljøskadelige stoffer, men som også er en ressource med et indhold af organisk stof, der kan bruges til produktion af biogas, og dermed el og varme.

Efter den mekaniske rensning af spildevandet blandes vandet med en kultur af såkaldt aktiv (biologisk) slam. Det er en kompleks mikrobiologisk suppe, der ved naturlig selektion er tilpasset til at kunne omsætte stofferne i spildevandet. Mikroorganismene i slammet nedbryder organisk stof til  $\text{CO}_2$  og vand (og mere slam), og omsætter kvælstoffet gennem nitrifikation og denitrifikation til frit atmosfærisk kvælstof  $\text{N}_2$ . Desuden indfanges organiske partikler, opløste stoffer, kvælstof og fosfor i slammet. Procestankene er udformet på utallige måder, men fælles for dem er, at man arbejder med tre hovedtilstande: 1) aerob: tilstedeværelse af ilt og evt. nitrat. 2) anoxisk: iltfrit men med tilstedeværelse af nitrat og 3) anaerob: hverken ilt eller nitrat er til stede i nævneværdige koncentrationer.

### Kvælstoffjernelsens Catch-22

Kvælstoffet i råspildevandet er reduceret, og findes som opløst  $\text{NH}_4^+$  eller organisk bundet i fx proteiner. For at det kan blive omdannet til frit kvælstof ( $\text{N}_2$ ), skal det først iltes i en aerob proces (nitrifikation), hvorefter det under anoxiske forhold skal reduceres, ved at slammet bruger nitraten som iltningmiddel til oxidation af organisk stof (denitrifikation). Omsætningsraten, og dermed det nødvendige procesvolumen, afgøres af temperaturen og af tilgængeligheden af letomsætteligt organisk stof. Det er oplagt at anvende råspildevandets indhold af organisk stof i denitrifikationen, men dette fjernes ved aerob respiration, hvis vandet som det første trin ledes til en aerob tank, for at nitrifikationen kan finde sted. Men uden nitrifikation ingen denitrifikation.

Denne udfordring er løst på mange forskellige måder, fx med recirkulationsprincippet. Her tilledes råspildevandet med dets indhold af letomsætteligt organisk stof først til en anoxisk tank. Nitraten tilføres ved at recirkulere en stor vandstrøm fra en efterfølgende aerob procestank, hvor nitrifikationen finder sted. I den aerobe procestank fjernes desuden resten af det organiske stof ved aerob respiration.

Det letomsættelige organiske stof er således en nødvendig og knap ressource i spildevandet, hvis man har en mekanisk fjernelse af organisk stof forud for de biologiske procestanke. En tommelfingerregel siger at man har behov for ca. 4 - 4,5 g organisk stof ( $\text{B}_5$ ) per gram N i spildevandet for at have tilstrækkeligt til en effektiv denitrifikation. Tilsætning af ekstra letomsætteligt organisk kulstof fx i form af melasse eller metanol direkte til den anoxiske tank kan hjælpe en utilstrækkelig denitrifikation, fx om vinteren.

For at holde en konstant mængde slam i procestankene, skal der løbende udtages overskudsslam svarende til væksten i det aktive slam. Dette udtag udgør det primære dræn af fosfor fra renseprocessen, og indeholder også en betydelig mængde kvælstof.

### Efterklaring og tertiær rensning

Det rensede vand og det aktive slam skal adskilles efter udløbet fra procestankene. Dette sker i store bundfældningstanke. Den hydrauliske kapacitet og effektivitet i adskillelsen af rensede vand og slam, der skal recirkuleres til indløbet af procestankene, afhænger bl.a. af tankens udformning og af slammets bundfældningsegenskaber. Slam, der vokser i tætte kolonier (flokke), bundfældes let og kan returpumpes til procestankene fra bunden af klaringsstanken. Fritsvævende mikroorganismer forlader anlægget med det rensede

vand, og let slam, fx forårsaget af mange trådformede mikroorganismer, vil flyde til overfladen i klaringsstankene, hvorfra det kan fjernes separat, uden at blive returneret til processen. Den største trussel mod bundfældningsegenskaberne kommer fra hurtige ændringer i spildevandets sammensætning, der kan stresseslammet. Det kan fx være hurtige temperaturskift eller vejsalt i forbindelse med snesmeltning eller periodevis tilledninger af giftige stoffer til anlægget. Ved udtag af overskudsslam kan man yderligere forbedre selektionen. Slam kan med en hydrocyklon fraktioneres i en let og tung del, og man kan udtage det lette slam som overskudsslam, og bevare de tungere flokke som grundstamme og "avlslår" i det aktive slam i procestankene. Visse mikroorganismer kan vokse i meget tunge såkaldte granuler. Et højt indhold af granulært slam gør det lettere at adskille slam og rensede vand i efterklaringsprocessen og betyder, at koncentrationen af slam i procestanken kan øges. Rensning af byspildevand baseret på granulært slam er en relativt ny metode, der kan medføre betydelig forøget kapacitet på anlægget både stofmæssigt og hydraulisk.

Hvis kravet til kvaliteten af det rensede vand er høj, kan et yderligere (tertiært) rensetrin være nødvendigt. Det kan fx bestå i filtrering, desinfektion eller kemisk rensning. Anvendelse af membraner til erstatning for efterklaringsstanken er en højeffektiv måde at adskille slam fra rensede vand på, se artiklen om membraner andetsteds her i bladet.

### Fosforjernelse

Fosfor er vigtigt næringsstof, der ikke skal udledes til vandmiljøet, men genvindes til gødsning i landbruget (se artiklen om fosfor andetsteds i dette blad). Fra spildevandet skal fosfor overføres til og fjernes med overskudsslammet. Fosforjernelsen kan ske kemisk-fysisk, med tilsætning af jern- eller aluminiumbaserede fældningsmidler, hvorved opløseligheden af fosfor i vandet sænkes. Samtidigt dannes kemisk slam bestående af metal-fosfor-hydroxid komplekser. Det biologiske overskudsslam og det løbende udtag af dette omfatter i størrelsesordenen 30 % af tilløbets indhold af fosfor. Denne andel kan forøges ved udvidet biologisk fosforjernelse, hvorved forbrug af fældningskemikalier og produktion af kemisk slam reduceres. Udvidet biologisk fosforjernelse bygger på at man i slammet stimulerer vækst af særlige "Bio-P" mikroorganismer, der kan lave et luksusoptag af fosfor. Under alle omstændigheder kræver en effektiv fosforjernelse at slam og rensede vand adskilles effektivt i den sidste del af

rensprocessen. Velfungerende efterklaringstanke kan matche et afløbskrav på ca. 0,5 mg P/l. Et filter efter en efterklaringstanke kan øge fosforrensningen, og brug af membraner i stedet for efterklaringstanke er en teknologi, der kan nedbringe indholdet af fosfor i det rensede vand til et meget lavt niveau, under 0,1 mg P/l.

## Ressourceanlægget – på vej mod mere bæredygtighed

Lavere klimabelastning er også et af fremtidens krav til spildevandsrensning. Mange vandselskaber har ambitioner om at opnå CO<sub>2</sub>-neutralitet, og dette forventes også at blive et lovgivningsmæssigt krav i den revision af EU's spildevandsdirektiv, der er på vej. I 2020 er der i Danmark vedtaget krav om at begrænse renseanlæggenes udledning af lattergas /2/. Dette er en ny udfordring, der skal medtages i processtyring, slamhåndtering mv.

Mere end 95 % af det danske medicinforbrug sker i eget hjem, og derfor udledes mange medicinrester med spildevandet fra husholdningerne. Mange af disse stoffer fjernes på et renseanlæg, men der er også stoffer, der kun nedbrydes dårligt i et traditionelt renseanlæg. Som eksempel kan man tage det smertestillende middel Voltaren (Diclofenac), der har en miljøsædende effekt med en PNEC på bare 50 ng/l /3/. Stoffet fjernes kun i begrænset grad i traditionel spildevandsrensning. Avanceret rensning fx med brug af ozon og aktivt kul kan være på vej for at gøre fjernelsen af medicinrester mere effektiv. I Schweiz er der indført krav til fjernelse af medicinrester og andet "mikroforurening", og udkastet til det nye EU spildevandsdirektiv sætter grænseværdier for indholdet af medicinrester i det rensede vand.

De største renseanlæg har muligheder for at være netto energiproducerende. Oftest via et biogasanlæg, som giver el- og varmeproduktion, eller ved brug af varmepumper som basis for fjernvarmeproduktion med rensede spildevand som varmekilde. Elforbruget til vandrensning i Danmark udgør omtrent 1 % af det samlede danske elforbrug til husholdninger og industri. Fald i vandforbrug og effektiviseringer på renseanlæggen har bety-

det, at bruttostrømforbruget til vandrensning fra 2007 til 2021 per person er faldet fra ca. 80 kWh/år til 63 kWh/år. 10 danske forsyninger har et netto overskud på energisiden på i gennemsnit 0,5 kWh/m<sup>3</sup> /4/. Mere energieffektiv beluftning, større udnyttelse af spildevandets organiske stof til biogasproduktion, bedre processtyring, separering af regn- og spildevand og et reduceret vandforbrug, er blandt forklaringerne på dette.

I 2019 blev 78 % af overskudsslam fra renseanlæg genanvendt på landbrugsjord, hvilket betyder at ca. 70 % af spildevandets indhold af fosfor blev returneret til landbruget /5/. Direkte genbrug af spildevandsslam i landbruget er under pres, da slammet indeholder giftstoffer, der kan skade miljøet. Det er vigtigt, at begrænsede ressourcer som fosfor genvindes og genudnyttes, men den gode erstatning for direkte anvendelse af slam på landbrugsjord er endnu ikke på plads (se artikler om fosfor og om slam andetsteds i bladet).

## Fra spildevand til plast og brint?

Opbygning af anlæg til at bruge overskydende vindmøllestrøm til produktion af brændstof, der kan oplagres (Power-to-X teknologier, PtX), har oplagte synergimuligheder med ressourceanlæggen. Biogas kan opgraderes biologisk eller katalytisk til naturgaskvalitet, der kan distribueres og oplagres via naturgasnettet, eller bruges lokalt som syntesegas i kemisk produktion af højværdiprodukter. Fremtidens PtX produktion af brint ved elektrolyse kræver store mængder ultrarent vand, og produktion af dette på basis af rensede spildevand er en oplagt mulighed. Eksempelvis er PtX-anlægget HØST under opførelse i Esbjerg, hvor man årligt skal bruge 1,2 mio. m<sup>3</sup> vand til produktion af 0,6 mio. ton NH<sub>3</sub>, der skal anvendes som skibsbrændstof eller gødning /6/.

Spildevand giver mulighed for avanceret bioteknologisk produktion af fx plastik og kemikalier. Teknologien til at producere biopolymerer og bioplast med spildevand som råvare er veldokumenteret på pilotskala /7/, men i fuld skala er høst af endogene polymerer (PHA) ikke rentabel endnu. Ekstracellulære polymerer (EPS), der er en naturlig del af bio-

film og granulært slam, er billigere at udvinde og oprense, og fx har man i Holland med Nereda® processen vist, at man kan udvinde industrielt anvendelige biopolymerer i stor skala /8/.

Måske kan renseanlæggen i fremtiden leve op til det navn, der spirer i branchen, og blive til rigtige ressourceanlæg, der ikke bare fjerner truende forurening af vandmiljøet, men også bliver en regulær kilde til produktion af grøn strøm, grønne brændstoffer og genbrug af vigtige ressourcer. Det kræver ikke alene en teknologisk omstilling, men også en organisatorisk tilpasning hos vandselskaberne og hos de myndigheder, der definerer vilkårene for vandselskabernes drift.

## Referencer

- /1/ EU direktiv 2000/60 EF, gennemført i den danske Lov om Vandplanlægning, LBK 126/2017.
- /2/ Regeringen, aftale af 16. juni 2020: Klimaplan for en grøn affaldssektor. [www.regeringen.dk/media/9591/aftaletekst.pdf](http://www.regeringen.dk/media/9591/aftaletekst.pdf)
- /3/ Christian Tranekær, Morten Boel Overgaard Andersen og Rune Fyrstenborg, COWI A/S (2021): Medicinrester i spildevand og vandmiljø. Udarbejdet for DANVA.
- /4/ DANVA (2008) og (2021): Vand i tal 2008 [www.danva.dk/media/4659/vand-i-tal-2008.pdf](http://www.danva.dk/media/4659/vand-i-tal-2008.pdf) og Vand i tal 2021 [www.danva.dk/viden/bm/vand-i-tal-2021/](http://www.danva.dk/viden/bm/vand-i-tal-2021/)
- /5/ Miljøstyrelsen (2020). Affaldsstatistik 2019. Miljøprojekt 2152. Redaktion: Marie L. Nygaard Madsen mfl. ISBN: 9788770382496.
- /6/ Copenhagen Infrastructure Partners, HØST ptX Esbjerg (2022). <https://hoestptxesbjerg.dk/da/faq/>
- /7/ Miljøstyrelsen (2018). BIOPOL – Udvinning af polymer fra spildevand. MUDP rapport. Redaktion Lars V. Toft, Aviaja A. Hansen og Jan Høeg. ISBN: 978-87-93614-53-6
- /8/ Silvio L. S. Rollemberg, Amanda F. d. Santos, Tasso J. T. Ferreira, Paulo I. M. Firmino & André B. d. Santos: Evaluation of the production of alginate-like exopolysaccharides (ALE) and tryptophan in aerobic granular sludge systems. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, vol. 44, p.259–270 (2021), Springer.

PEDER HVID MARIBO, Lektor, Institut for Byggeri og Bygningsdesign, Århus Universitet. [pm@cae.au.dk](mailto:pm@cae.au.dk)