

Rensemekanismer i rodzoneanlæg

af Jørgen Skaarup & Bo Neergaard-Jacobsen, Vandkvalitetsinstituttet

I denne artikel behandles rensemekanismer i rodzoneanlæg. Ved rodzoneanlæg forstås en kunstigt etableret og velfagrænsel bevoksning af sumpplanter til rensning af spildevand. Anlægget er sikret mod nedsvivning og har kontrolleret til- og afløb. Det vigtigste element er rodzonen, d.v.s. området umiddelbart omkring sumpplanternes rødder. Til denne zone vil planterne leve i et selskab med mikrobiel nedbrydning, med ilt kan foregå. Udenfor denne zone findes en zone uden ilt. Denne veksling med oxiderende og reducerende forhold betinger en effektiv mikrobiel omsætning af organisk stof og kvælstof. Dette forhold har endvidere stor betydning for en jern- og fosfat-omsætning, der resulterer i en kemisk fældning af fosfat i rodzoneanlæg.

Indledning

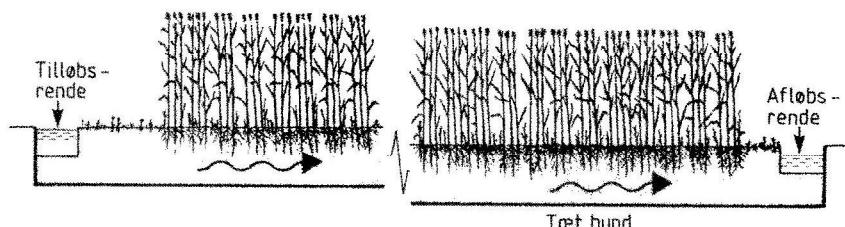
Rodzoneanlæg er en ny spildevandsrensningssmetode, der udnytter den effektive rensning i jordsystemer. Rodzonemetoden har i den senere tid været genstand for stor debat, særlig i sammenhæng med kommunernes spildevandsplaner. Da rodzonemetoden er en ny metode i Danmark, har debatten dog til dels også været præget af misforståelser omkring, hvad rodzoneanlæg egentlig er for noget. Formålet med denne artikel er derfor at definere, hvad der efter forfatternes mening skal forstås ved rodzoneanlæg og kvalitativt prøve at forklare, hvordan et rodzoneanlæg virker.

Et rodzoneanlæg er kun tilsyneladende primitivt, idet de processer, der foregår i disse anlæg svarer til processerne i et mekanisk-biologisk-kemisk renseanlæg med kvælstoffjernelse. Den umiddelbart mest iøjnefaldende fordel ved rodzoneanlæg er muligheden for kvælstof- og fosforfjernelse,

som ellers kun opnås i de allermest avancerede anlæg. Således regner man med at opnå en kvælstoffjernelse på mere end 80%, og en fosfatfjernelse på mere end 90% i et rodzoneanlæg.

2. Principbeskrivelse

En principskitse af et rodzoneanlæg er givet i fig. 1.



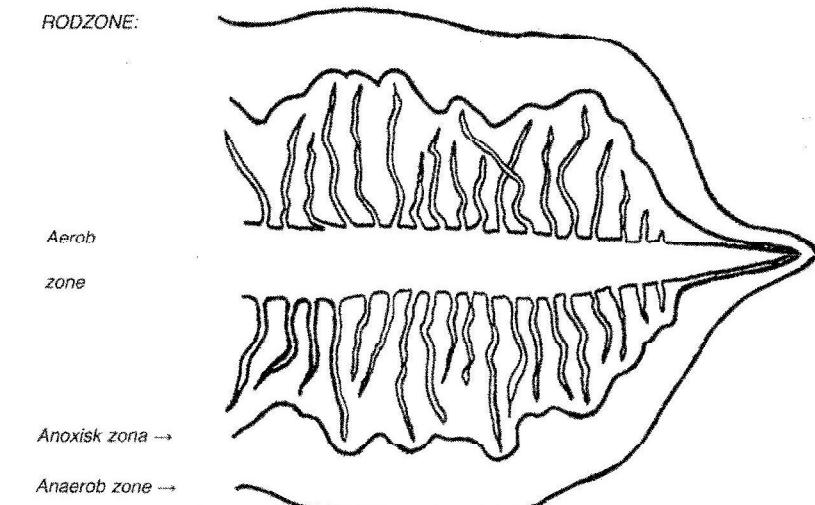
Figur 1: Principskitse af et rodzoneanlæg.

Af fig. 1 ses, at principippet er at lade spildevandet passere næsten vandret gennem en planterodzone og således udnytte den biologisk mest aktive del af jorden gennem hele anlægget. Jorden i rodzoneanlægget er vandmættet og strømningen foregår derfor ved vandmættede betingelser. Ved rodzoneanlæg tilstræbes, at der ikke foregår overfladisk afstrømning, der vil give en ringe rensning. På fig. 1 skal

bemærkes en anden vigtig ting, nemlig at anlægget bør forsynes med *tøt* bund, således at der ikke bliver tale om nedsvivning.

Planterne i et rodzoneanlæg har ikke nogen direkte funktion i renseprocessen, som er mikrobiel og fysisk/kemisk. Planterne har derimod to andre vigtige funktioner. For det første sørger planterne for en stor passiv

transport af ilt fra atmosfæren ned i den vandmættede jord, og for det andet danner planterne et poresystem i rodzonen, der bevirker en høj hydraulisk ledningsevne af jorden, selv om denne har et højt lerindhold. Dette skyldes dannelse af porer i jorden, der er i stand til at transportere betydelige vandmængder i forhold til den omgivende jord [3]. Den mest lovende plante i forbindelse med rodzonean-



Figur 2: Principskitse af en rodzone, som illustrerer iltforholdene omkring en planterod.

læg synes at være Tagrør (*Phragmites communis*) /5/, /12/ evnt. efterfulgt af Dunhammer eller Søkogleaks /6/.

3. Rensemekanismer i rodzoneanlæg

Det centrale element i rensemekanismen i et rodzoneanlæg er (naturligvis) rodzonen. Herved forstås området omkring planterødderne, hvor iltforholdene veksler mellem aerobe (ilttrige) og anaerobe (iltfri) forhold. Dette er også arkivuelegjort på fig. 2.

Netop denne veksling mellem aerobe og anaerobe betingelser omkring sumplanternes rødder er årsagen til rodzoneanlæggets mulighed for kvælstof- og fosforfjernelse.

I det følgende gives en stærkt forenklet gennemgang af de vigtigste forureningsparametres rensning i rodzoneanlæg.

3.1 Organisk stof nedbrydning i rodzoneanlæg

Nedbrydning af organisk stof måles f.eks. som nedsaættelsen af biokemiisk iltforbrug over 5 dage (B_{1_5}) ved passage gennem anlægget.

I et rodzoneanlæg vil der foregå tre hovedtyper af nedbrydning:

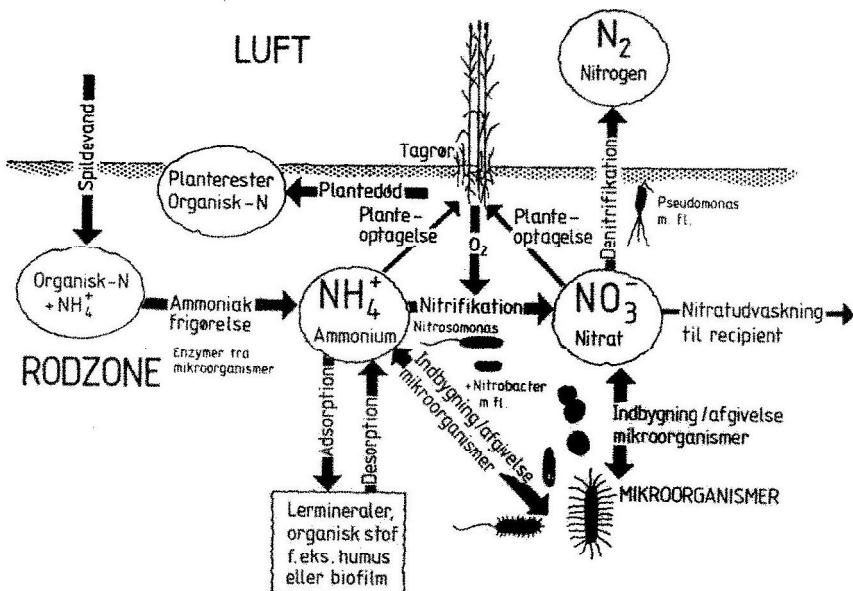
- 1) nedbrydning med ilt (aerob nedbrydning)
- 2) nedbrydning uden ilt men med nitrat (anoxisk nedbrydning)
- 3) nedbrydning uden ilt eller nitrat (anaerob nedbrydning)

Det er netop en vekselvirkning mellem disse nedbrydningsformer, der som det senere vil blive omtalt betinger en stor kvælstof- og fosforfjernelse fra rodzoneanlæg. Desuden kan dette også være gunstigt for nedbrydning af visse svært nedbrydelige organiske stoffer, f.eks. klorerede kulbrinter /8/.

3.1.1 Nedbrydning med ilt (aerob nedbrydning)

iltforsyning

Ved nedbrydning af organiske stoffer med tilstedeverelse af ilt, har planterne i rodzoneanlægget en nøglepo-



Figur 3: Skitse af kvælstofomsætningen i rodzoneanlæg. Størkt forenklet skitse.

sition. I en vandmættet jord som findes i et rodzoneanlæg, vil der ikke kunne ske nogen væsentlig transport af ilt gennem jorden, da alle porer i jorden vil være fyldt med vand (ilt diffunderer meget langsomt gennem vand i forhold til luft). Da vandplanternes rodnet ikke kan hente den nødvendige ilt fra jorden, må de selv skaffe den »indfra«. Den del af planterne der befinner sig over vandoverfladen, er forbundet med rodsystemet via et intercellulært luftforsyningsvæv (aerenchym), som kan transportere ilt til vækstdelene under vandoverfladen. Ydermere er planterødderne ikke »gastætte«. Således vil ilt kunne diffundere fra rødderne ud i jorden. Rundt om rødderne vil opstå en zone med ilttrige forhold (iltholdig rhizosfære), hvor aerob nedbrydning af organisk stof kan foregå. I denne zone vil også ske en nitrifikation (iltning af ammonium til nitrat) ved tilstrækkelige iltforhold /1/, /9/.

Nedbrydning

Såfremt der er ilt nok tilstede, er nedbrydningsforløbet enkelt, idet alt let nedbrydeligt organisk stof omdannes til kuldioxyd og vand. Desuden vil al kvælstof i spildevandet ildes til nitrat. Altså en analog proces til vidtgående biologisk rensning.

3.1.2 Nedbrydning uden ilt, men med nitrat (anoxisk nedbrydning)

Mange mikroorganismer (f.eks. *Pseudomonas*) er i stand til at nedbryde organisk stof uden tilstedeverelse af ilt. I stedet kan de anvende nitrat (NO_3^-) som iltningsmiddel: I principippet sker der altså det samme som

ved nedbrydning med ilt, som blot erstattes med nitrat. Ved nedbrydning af organisk stof med nitrat som iltningsmiddel sker desuden en denitrifikation. Dog fås der mindre energi ud af iltning med nitrat, og de fleste mikroorganismer vil derfor foretrække ilt som iltningsmiddel fremfor nitrat. De fleste denitrificerende bakterier er derfor såkaldte »fakultative anaerober«, idet de kun bruger nitrat ved mangel på ilt.

3.1.3 Nedbrydning uden ilt eller nitrat (anaerob nedbrydning)

Andre bakterier kan udnytte sulfat (SO_4^{2-}) i stedet for ilt. Sulfaten bliver så reduceret til svovlbrente (H_2S), som lugter af rådne øg og er et velkendt problem ved lange afskærende ledninger med råt spildevand. Disse bakterier er ofte »obligat anaerobe«, d.v.s. de kan ikke bruge ilt, som endda kan være toksisk for dem.

Det er dog endnu mere ineffektivt at udnytte sulfat i forhold til ilt og nitrat, og disse bakterier har derfor kun betydning for omsætningen i et rodzoneanlæg omkring indløbsfaskinen, hvor de kan forårsage ubehagelig lugt.

3.2. Kvælstofomsætning i rodzoneanlæg

Kvælstof (N) er typisk tilstede i spildevandet bundet i organisk stof (aminosyrer, urinstof o.s.v.) eller som ammonium (NH_4^+). I visse tilfælde findes desuden en smule nitrat (NO_3^-) i spildevandet. Kvælstofs skæbne i et rodzoneanlæg er en yderst kompleks proces. Kvælstof findes i en lang række uorganiske forbindelser, som NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- -ioner og på gasform som NH_3 , N_2 og kvælstofoxider (N_2O , NO).

NO_2). Alle disse komponenter kan transformeres til andre af en række biokemiske og kemiske processer. En ørørkt foronklet skitse af kvælotofomsætningen i et rodzoneanlæg fremgår af figur 3. Det skal understreges, at figuren ikke må betragtes som fyldest-gørende.

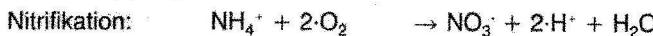
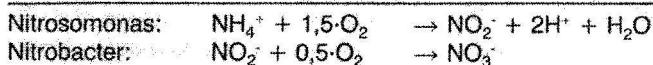
Omkring indløbet til den egentlige rodzone vil der foregå en ammonifikation, d.v.s. at organisk bundet kvælstof frigives som ammoniak under påvirkning af enzymer fra mikroorganismer. Ammoniaken findes ved normal jords pH-værdi udelukkende som ammonium-ioner. Jorden har en stor binding-

nogen ophobning af nitrit. Den bloke-miske proces fremgår af tabel 1.

Nitrifikationsprocessen er forholds-vis følgeom overfor temperatur og toksiske stoffer, men vil være sikret mod disse to parametre fuldt ud så godt som ved traditionel biologisk rensning.

3.2.2 Denitrifikation

Denitrifikation er den absolut vigtigste proces, hvorved kvælstof kan tjenes i et rodzoneanlæg. Denitrifikation kræver iltfri forhold, men samtidig tilstedevarelse af nitrat (anoxiske forhold) og organisk stof. Under disse forhold, som vil opstå i en vis afstand



Tabel 1.: Nitrifikation består af to mikrobielle delprocesser udført af »nitrosomonas« og »nitrobacter«.

skapacitet overfor ammonium-ioner, der derfor praktisk taget ikke vil findes i den frie jordvæske, men bundne til jordpartiklernes overflader.

3.2.1 Nitrifikation

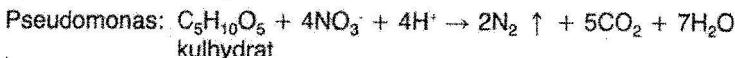
Nitrifikation er en vigtig mikrobiel proces, hvorunder ammoniumioner (NH_4^+) ildes til nitrat-ioner (NO_3^-). Da der er tale om en iltning, kræves ilt (O_2) til processen. I et rodzoneanlæg vil der findes ilt omkring planternes rødder og nitrifikation vil kunne foregå i denne zone. Nitrifikationen er i virkeligheden to processer, der forestås af to forskellige typer bakterier. Først ildes ammonium (NH_4^+) til nitrit (NO_2^-) af nitroso-monas bakterier, hvorefter nitrit (NO_2^-) ildes videre til nitrat af nitrobacter bakterier. De to bakteriearter findes i praksis altid sammen, hvorfor der under normale omstændigheder ikke opstår

fra planternes rødder, vil mange bakterier (fakultative anaerobe såsom *Pseudomonas* m.fl.) kunne udnytte nitrat (NO_3^-) i stedet for ilt (O_2) i deres respiration. Herved omdannes nitrat (NO_3^-) først til nitrit (NO_2^-) og herefter til gasformig kvælstof (nitrogen - N_2) Brutto-processen, som i virkeligheden består af flere trin, fremgår af tabel 2.

I et rodzoneanlæg kan ofte omkring 80% af det tilførte kvælstof denitrificeres på grund af væksling mellem iltitive og iltfri zoner. Dette kræver dog tilstrækkelig kulstofkilde i form af organisk stof /7/, /10/.

3.3 Fosfatjernelse

Foruden mikrobiel nedbrydning kan en række andre processer deltage i renseprocessen i jord. Her er tale om fysisk-kemiske processer, som er afhængige af jordens struktur.



Tabel 2: Eksempel på bruttoproces for denitrifikation udført af »Pseudomonas« med kulhydrat som kulstof- og energikilde.

Disse processer er:

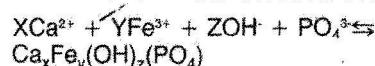
- 1) Filtrering
- 2) Sorption
- 3) Ionbytrning
- 4) Kompleksdannelse
- 5) Udfældning

hvor der ofte findes en glidende overgang mellem de fire sidste processer.

Udfældning er den vigtigste fjernesmekanisme for fosfat. Denne er yderst kompliceret og den følgende gennemgang må derfor nødvendigvis blive stærkt forenklet.

Fosfatfældning

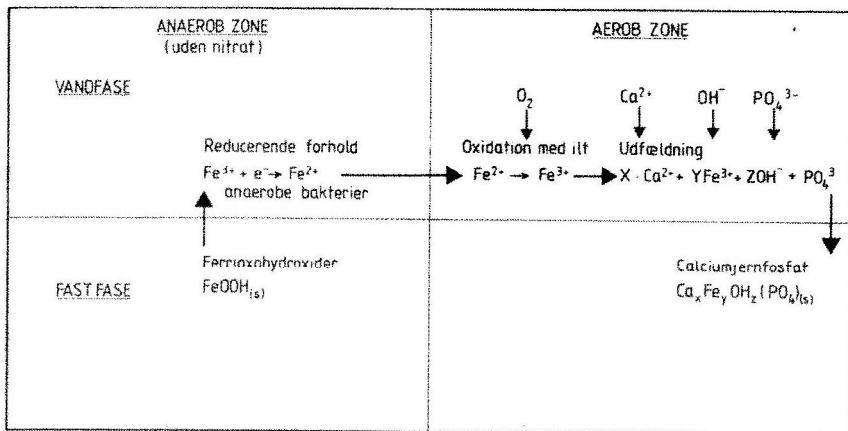
Ved simultanfældning af fosfat i aktiverede slamanlæg, hvor der hersker forhold analoge til den aerobe del af et rodzoneanlæg, vil også *calcium-ioner*, som findes i store mængder i spildevandet, spille en væsentlig rolle for udfældningen /2/ og /11/. Fosfaten vil udfældes i en blandet forbindelse efter følgende ligevægt:



hvor x, y og z kan variere afhængig af de aktuelle forhold. Denne blandingsforbindelse vil være meget tungtopløselig. I et simultanfældningsanlæg til-sættes jernioner til at sørge for udfældningen. I et rodzoneanlæg tilføres ikke jern, da dette praktisk taget ikke findes i spildevandet. Derimod findes store mængder jern udfældet i jorden som jernoxider og hydroxider, og her kommer samspillet mellem områder med iltfri og iltholdige områder i rodzonanlægget igen ind i billedet.

Jernomsætning i iltfri (anaerobe) zoner

Anaerobe bakterier vil ofte have enzymsystemer, der kan reducere ferri-ioner (Fe^{3+}) til ferroioner (Fe^{2+}) /4/. Da ferrohydroxid er langt lettere opløselig end ferrihydroxid, betyder dette frigivelse af ferroioner. Det skal bemærkes, at reduktion af ferriioner til ferroio-



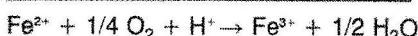
Figur 4: Teoretisk skitse af jerntransport og fosfatfældning i et rodzoneanlæg.

ner ikke kan ske ved *anoxiske* forhold (uden ilt, men *med* nitrat tilstede). Først når nitrat er opbrugt og der opstår »ægte« anaerobe forhold, vil ferri reduceres /11/.

De opløste ferro-ioner vil herefter kunne transporteres med vandet til iltige zoner.

Jernomsætning i iltige (aerobe) zoner.

Ved tilstedeværelse af ilt vil ferroioner hurtigt oxideres til ferriioner:



Når først ferri er gendannet, vil det øjeblikkelig fælde ud igen, men denne gang sammen med calcium, hydroxid og *fosfat* i en tungtopløselig forbindelse, jfr. afsnittet om fosfatfældning.

I rodzoneanlægget vil således opstå en transport af jern fra de anaerobe zoner til de aerobe zoner, hvor jernet udfældes igen sammen med bl.a. fosfat.

Denne proces er illustreret i fig. 4.

I et rodzoneanlæg kan således opnås en effektiv fosatfjernelse. Der er dog også visse begrænsninger. Fosatfældningen vil være begrænset af den jernmængde, der findes tilgængelig i de anaerobe zoner samt den plads, der er til udfældning i de aerobe zoner. De anaerobe og aerobe zoner er ikke faste i tid og sted. En aerob zone kan således gå hen og blive anaerob. Herved kan den udfældede fosfat gå i oplosning igen og udvaskes fra zonen. Den opstillede teori indeholder dog også en indlysende mulighed for forbedring af fosatfældningen i et rodzoneanlæg. Tilføres jern i indløbsfaskinen, f.eks. i form af terrihydroxid (oker), vil dette jern langsomt tilføres anlægget og bevirkе en forbedret fosatfældning.

4. Forsøg med rodzoneanlæg

Med henblik på at afklare nogle af tvivlsspørgsmålene omkring rodzoneanlæg har Ringsted Kommune i efteråret 1983 etableret et forsøgsanlæg bestående af 12 parallele strenge. Disse anlæg beplantes i foråret 1984. Miljøstyrelsen yder støtte til undersøgelser på dette anlæg, der udføres med Vandkvalitetsinstitutet som konsulenter. Forsøg er tilsvarende igangsat i Rødekro Kommune omend i mindre omfang og det vides, at en lang række kommuner landet over har planer om/er i færd med at etablere rodzoneanlæg.

I Ringsted'er forsøgene planlagt til at undersøge udvalgte designparametres indflydelse på den hydrauliske kapacitet og rensningseffektivitet for organisk stof og næringssalte. Følgende parametre undersøges:

1. Betydning af faldet (1.5 og 7.5%) gennem anlægget og dybden af rodzon.
2. Forskellige tilløbsfaskiner (stor og lille).
3. Betydning af jordtype (3 typer).
4. Plantetype (Tagrør og Dundhammer).
5. Utplantningstæthed.

Forsøgene i Ringsted kan betegnes som et pilotskala projekt, som vil simulere forløbet af en række muligheder for opbygning af rodzoneanlæg. Rodzonens udvikling tager tid og der vil således gå nogle år før resultaterne foreligger.

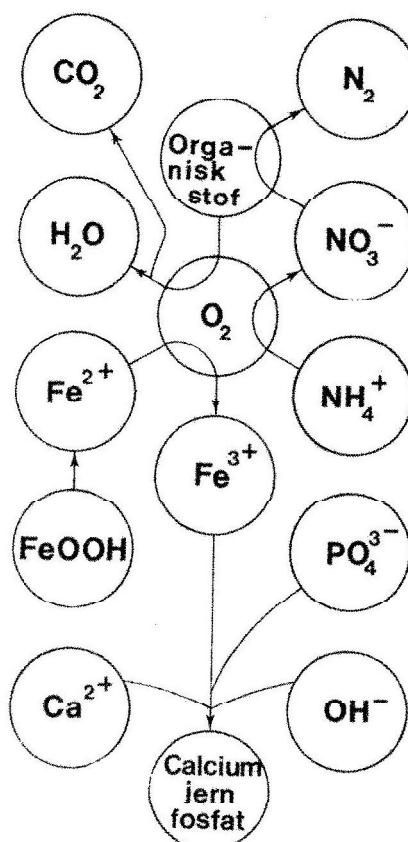
Med den store interesse der er i øjeblikket samt det store potentiel, der ligger i anvendelse af rodzoneanlæg, mener vi at man bør supplere de nu igangsatte undersøgelser med en række forsøg i laboratorieskala. Herved vil man inden for kortere tidshorisonter kunne udfyde nogle af de »videnhuller«, der idag eksisterer omkring rodzonemetoden.

5. Sammenfatning

For de tre vigtigste komponenter: organisk stof, kvælstof og fosfor findes et samspil mellem de forskellige rensemekanismer, som er søgt illustreret i fig. 5.

Organisk stof nedbrydes således både under iltfri og iltige forhold. Såfremt der er nitrat tilstede under iltfri forhold, udnyttes nedbrydningen desuden til kvælstoffjernelse: nitrat (NO_3^-) reduceres til kvælstof (N_2) i iltige zoner nedbrydes det organiske stof til kuldioxid (CO_2) og vand (H_2O).

RENSEMECHANISMER I RODZONEANLÆG



Figur 5: Samspil mellem forskellige rensemekanismer i rodzoneanlæg.

Kvælstof findes næsten udelukkende som ammonium (NH_4^+) i spildevandet og under ilttrige forhold kan dette ammonium iltes til nitrat (NO_3^-) ved en mikrobiel nitrifikationsproces. Når først nitraten er dannet, kan denne reduceres til kvælstof (N_2) under iltfri forhold og samtidig nedbrydning af organisk stof. Nitraten bliver udnyttet som iltningsmiddel af anaerobe mikroorganismer i stedet for ilt.

Fosfat kan udfældes sammen med jern og calcium. Denne udfældning er dog noget kompliceret, idet jernet skal forefindes i oxideret form (Fe^{3+}). I jorden findes ofte store mængder jernoxider. Når disse jernoxider udsættes for iltfri (reducerende) forhold, vil jern gå i oplosning på reduceret form (Fe^{2+}). Når reduceret jern (Fe^{2+}) kommer i forbindelse med ilt (O_2) vil det spontant oxideres til oxideret jern (Fe^{3+}). Nu findes jern igen på oxideret form (Fe^{3+}) og fælder ud igen sammen med calcium (Ca^{2+}), hydroxid (OH^-) og fosfat (PO_4^{3-}) i en tungtopløselig calcium-jern-fosfat. Foruden udfældning kan fosfat temporært adsorberes til jordpartikler.

Rodzoneanlæg er en effektiv rensemetode fuldt på højde med biologiske rensningsanlæg. Metoden kræver dog en højteknologisk viden for forståelsen af de involverede processer. Til forskel fra de andre metoder er der knap så

stor erfaring med, hvordan rodzoneanlæg skal dimensioneres. En stor ulempe ved rodzoneanlæg er endvidere, at de først når deres fulde hydrauliske kapacitet efter 2-3 år, hvilket kan være et problem i nogle tilfælde. Rodzoneanlæg skal (naturligvis) dimensioneres efter både den organiske og den hydrauliske belastning. Tyske tommelfingerregler er $2-6 \text{ m}^2$ rodzone pr. personækvivalent, afhængig af separat eller fælles kloak. Hvordan man i detaljer dimensionerer et rodzoneanlæg efter tysk praksis, vil det føre for vidt at komme ind på her.

Man må ikke forledes til at tro, at et rodzoneanlæg virker, ligegyldigt hvad man gør ved det. Ligesom almindelige renseanlæg har rodzoneanlæg begrænsninger. Overbelastes anlægget hydraulisk eller med organisk stof, vil der ske nøjagtigt det samme som ved alle andre anlæg: *det virker ikke*. Derfor er det nødvendigt at få metoden undersøgt nærmere her i Danmark, således at rimelige dimensioneringsregler kan opstilles.

6. Referencer

- *1/ Armstrong, W. (1970) Rhizosphere Oxidation in Rice and other Species: A mathematical Model Based on the Oxygen Flux Component. *Physiologia Plantarum*, Vol. 23, p. 623-630, 1970.
- /2/ Arvin, E. (1983) Observations supporting phosphate removal by biologically mediated chemical precipitation. A review. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 15, No. 3/4, pp. 43-63, 1983.
- /3/ Beven, K. and Germann P. (1982) Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 1311-25. Oct. 82.
- /4/ Brock, T.D. (1974) *Biology of microorganisms*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.
ISBN: 0-13-076992-4.
- /5/ De Maesener, J. et al. (1982) Use of artificial reed marshes for treatment of industrial waste waters and sludge. *Studies on Aquatic Vascular Plants edited by Symoens, J.J. et al.* Royal Botanical Society of Belgium. Brussels 1982 pp. 363-369.
- /6/ Finlayson, C.M. Chick, A.J. (1983) Testing the potential of aquatic plants treat abattoir effluent. *Water Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 415-422, 1983.
- /7/ Gersberg, R.M. et al. (1983) Nitrogen removal in artificial wetlands. *Water Research*, Vol. 17, No. 9, pp. 1009-1014, 1983.
- /8/ Kobayashi, H. Rittmann, B.E. (1982) Microbial removal of hazardous organic compounds. *Env.Sci. and Tech.*, Vol. 16, No. 3, pp. 170-83, 1982.
- /9/ Kopp, R. (1983) Rodzonemetoden - et alternativ til konventionel spildevandsrensning. Oversat fra tysk af civ.ing. C.T. Winkel. (F.A.G.)
- /10/ Reddy et al. (1980) Nitrate Reduction in an Organic Soil-Water System. *J. Environ.Qual.* Vol. 9, No. 2, p.p. 283-288 1980.
- /11/ Skaarup, J., Thorsen, E. (1982) Anvendelse af okker til fosforfjernelse i rensningsanlæg. Vandkvalitetsinstitutet (ATV). IPB rapport 1982.
- /12/ Wolverton, B.C. et al. (1983) Microorganisms and Higher Plants for Waste Water Treatment. *J. Environ.Qual.* Vol. 12, No. 2, p.p. 236-242 1983.