

Suspensjoners synkehastighet

Metode for analyse av finfordelte partiklers synkehastighet i vann.

Av Øivind Tryland, Egil Støren og Eigil R. Iversen

Alle forfatterne er ansatt på Norsk Institutt for vannforskning (NIVA)

Sammendrag

Synkehastigheten for en suspensjon som inneholder finfordelte partikler kan beskrive kvantitativt ved sedimenterings-tester og beregninger basert på kontinuitetsligningen. Metoden omfatter analyser av partikkelkonsentrasjon på forskjellige dyp i en stillestående vannsøyle. Beregningene utføres ved hjelp av dataprogrammet SUSPEN. Den gjennomsnittlige synkehastigheten beregnes som funksjon av sedimenteringstid og dyp. Metoden er enkel eksperimentelt og krever ingen data om partiklenes tetthet, form eller vannets viskositet etc. I prinsippet er metoden anvendbar for alle typer suspensjoner som inneholder langsomt synkende partikler.

Innledning

Ved mekaniske og kjemiske sedimenteringsprosesser er målsætningen å få en hurtig og effektiv separasjon av det partikulære materialet. I de kjemiske kloakkrensaneanlegg består partiklene som skal bunnfelles, for en stor del av volumløse og langsomt synkende fnokker som særlig inneholder jern (III)- eller aluminiumhydroksyd. Innenfor industriell vannbehandling vil det suspenderte materiale

som skal utfelles, bestå av mange ulike typer partikler, som f.eks. trefiber, leirpartikler, flotasjonsavgang, metallhydroksyder, støv m.m. Felles for de mekaniske og kjemiske renseprosesser er at det partikulære materialet bunnfelles ved gravitasjon i sedimenteringsbassenger. Oppholdstid i bassenget, bassengets utforming og, ikke minst, partiklenes synkehastighet er avgjørende for anleggets renseeffekt.

Synkehastigheten for en gitt suspensjon avhenger av partiklenes form, størrelse, tetthet og vannet innhold av løste komponenter som kan destabilisere partiklene. Vannets pH, saltinnhold og dets innhold av koagulanter eller andre overflateaktive stoffer er derfor av avgjørende betydning for partiklenes synkehastighet. Partiklenes synkehastighet påvirkes også av andre partikler i vannet, og derfor vil en økning eller senkning av partikkelkonsentrasjonene også kunne endre partiklenes sedimenteringsegenskaper. I tillegg vil vannets temperatur, tetthet og viskositet ha en viss betydning for partiklenes synkehastighet.

En ikke-stabil suspensjon er vanligvis sammensatt av partikler med ulik størrelse som synker med forskjellig hastighet. De minste partiklene som sedimenterer vil

ha en diameter ned mot 1 μm , mens mindre partikler er stabile og holdes i suspensjon på grunn av Brownske bevegelser (O'Melia, 1980). Synkehastigheten for partiklene kan i teorien beregnes etter Stokes ligning, men den forutsetter at 1) partiklene er kuleformede under hele sedimenteringsprosessen og 2) partiklene ikke påvirker hverandre innbyrdes (Miller, 1964). Disse forutsetningene er ikke eller svært sjelden oppfylt i forbindelse med vannrensing. Stokes ligningen og avledninger av den ligningen har derfor svært begrensede anvendelsesmuligheter.

En ganske annen metode for beregning av suspensjoners synkehastighet ble introdusert av McLaughlin (1959). Denne metoden er basert på kontinuitetsligningen i én dimensjon, dvs. loddrett partikkelbevegelse under påvirkning av gravitasjonskrefter. Metoden er nærmere omtalt nedenfor, og den anvendes ved NIVA for kvantifisering av partiklers/suspensjoners synke-egenskaper under varierende kjemiske og fysiske betingelser. Noen av fordelene med denne metoden er:

- Enkel eksperimentelt
- Krever ikke kjennskap til partiklens tetthet, form, væskens tetthet, viskositet etc.
- Mulig å kvantifisere suspensjonens gjennomsnittlige synkehastighet som funksjon av tid og dyp
- Mulig å registrere/kvantifisere flokkulering eller forhindret sedimentering
- Egnet for å undersøke blandinger der partiklens form, størrelse og tetthet endres under sedimenteringsprosessen.

Metoden kan i utgangspunktet brukes for alle typer suspensjoner som inneholder langsomt synkende partikler. Prinsippet

vil også kunne anvendes for å undersøke stabiliteten til emulsjoner, f.eks. olje i vann.

Prinsipp

Suspensjonens sedimenteringshastighet beregnes på grunnlag av sedimenteringstester hvor partiklene synker i en stillestående vannsøyle (Figur 1). Serier av vannprøver tappes ut fra forskjellige dyp i sedimenteringsrøret under sedimenteringsprosessen. Partikkelkonsentrasjonen måles og analysedata behandles etter en metode beskrevet av McLaughlin (1959). Metoden er også omtalt av Vanoni (1975) og Tryland og Støren (1978).

Beregningene er basert på kontinuitetsligningen i én dimensjon, dvs. vertikal partikkelbevegelse:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (vC)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

der C = Partikkelkonsentrasjon (suspendert stoff, turbiditet eller andre egnede parametre)

v = Suspensjonens lokale, gjennomsnittlige sedimenteringshastighet (cm/min.)

t = Sedimenteringstid (min.)

z = Dyp under overflaten (cm)

Det fysiske innhold i denne ligningen ligger i at differansen i partikkelmengden som synker inn og ut av et tenkt væskelolum, er lik partikkeløkningen i det samme volumet.

Integrasjon av ligningen gir:

$$(vC)_D = - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^D C dz \quad (2)$$

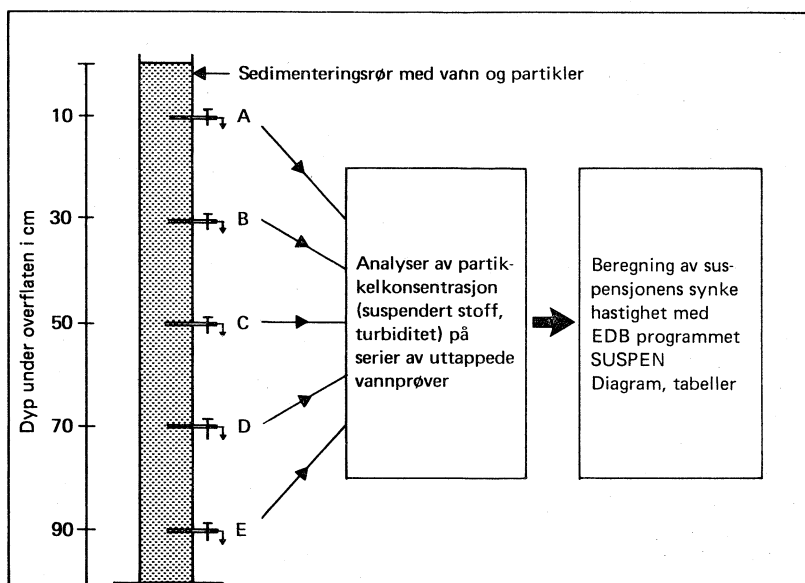
Denne ligningen brukes for beregningen av suspensjonens gjennomsnittlige sedimenteringshastighet v . Ved beregningen av v på dyppet D måles de tilsvarende arealene i konsentrasjonsprofilidiagram (Figur 2). Arealene plottes som funksjon av sedimenteringstid (t_1, t_2, t_3 etc.). Hellingen på kurven er lik høyre side av ligning (2). Deretter beregnes v på forskjellige tidspunkt fordi C er kjent. Denne prosedyren gjentas for hvert dyp i sedimenteringsrøret. Alle disse beregningene foretas med dataprogrammet SUSPEN.

Sedimenteringsutstyr

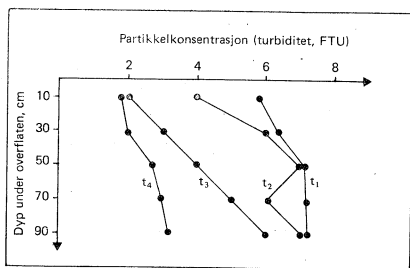
Sedimenteringsrøret som benyttes er et 100 cm høyt gjennomsliktig rør med en indre diameter på 12 cm. Vannprøver tappes ut fra senteret i kolonnen gjennom små metallrør som er plassert på fem dyp, dvs. 10, 30, 50, 70 og 90 cm under vannoverflaten (Figur 1). Røret er laget av pleksiglass og rommer ca. 12 liter.

Sedimenteringstest

Suspensjonen som skal undersøkes helles i sedimenteringsrøret. Et padlerøverk med en variabel hastighetsregulator



Figur 1. Suspensjonens synkehastighet undersøkes i sedimenteringsrør der siderør for uttapping av vannprøver er plassert i fem forskjellige nivåer. Partikkelkonsentrasjonen analyseres og dataprogrammet SUSPEN beregner suspensjonens gjennomsnittlige synkehastighet.



Figur 2.

Konsentrasjonsprofilidiagrammet viser turbiditet for aluminiumshydroksydpartikler på forskjellige dyp og sedimenteringstid ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$). Partikkelens synke hastighet beregnes ved integrasjon av kurver i slike diagram.

(1—200 rpm) fordeler partikkelen i røret. For å undersøke om suspensjonen er homogent fordelt i røret, tappes vannprøver fra hvert uttak før røringen stanses. Disse prøvene analyseres sammen med de andre prøver som tappes fra røret senere.

I tester med koagulanter som inneholder jern (III) eller aluminium benyttes en annen fremgangsmåte. Løsningen som inneholder koagulantene tilsettes først røret. Deretter tilsettes en basisk løsning under omrøring inntil pH er innenfor det optimale område for generering av partikulære metallhydroksyder.

Sedimenteringstiden beregnes fra tidspunktet som røreverket stanses. Mens partikkelen synker tappes serier med vannprøver fra hvert av de fem siderørene. Volumet pr. prøve bør være minst mulig for å unngå forstyrrende vannbevegelser og senking av overflaten. Prøvevolumet bør derfor være mindre enn 30 ml. Tidsintervallene mellom hvert prøveuttak velges etter hvor raskt partikkelen synker. Ved raskt synkende partikler tappes det ut prøver hyppig i første del av sedimen-

teringsprosessen. I tester med langsomt synkende partikler fordeles prøvetakningene over en lengre periode.

Partikkelkonsentrasjonen i vannprøvene bør analyseres så raskt som mulig. Suspensert stoff eller turbiditet er de vanligste måleparametrene. Turbiditeten er enkel å måle, men er generelt ikke proporsjonal med partikkelkonsentrasjon. Analyser av antallet partikler med f.eks. Coulter Counter vil være mer nøyaktige, særlig ved liten partikkelkonsentrasjon.

Databehandling

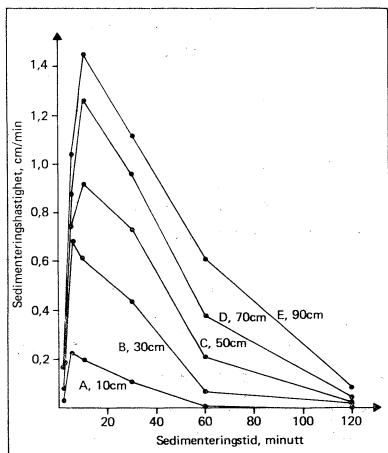
Sedimenteringshastigheten beregnes etter EDB-programmet SUSPEN som også tar hånd om lagring og administrasjon av data fra flere forsøk. Det er skrevet i FORTRAN og kjøres på en NORD-100 maskin. Innebygget i SUSPEN-programmet ligger følgende muligheter for utskrift av tabeller og diagrammer:

- *Opprinnelige måledata.* Partikkelkonsentrasjon på forskjellige dyp for hvert prøvetakingstidspunkt.
- *Konsentrasjonsprofilidiagram.* Kurver som viser variasjonen i partikkelkonsentrasjon i sedimenteringsrøret på forskjellige tidspunkt (Figur 2). Disse kurvene er grunnlaget for beregningen av partikkelens sedimenteringshastighet.
- *Hastighetsdiagram.* Kurver viser endringene av den gjennomsnittlige sedimenteringshastighet i løpet av sedimenteringsprosessen (Figur 3). Den samme informasjon kan gis i form av tabeller.

Tolking av diagram

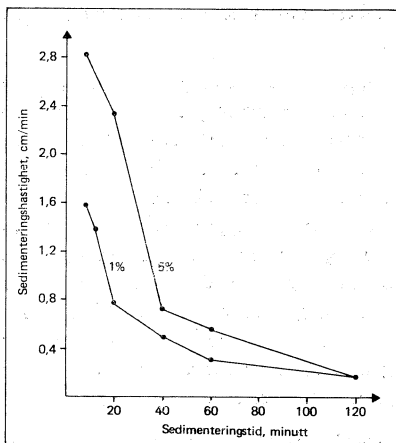
Dersom hastighetsdiagrammet inneholder kurver med maksimalverdier, slik som i figur 3, viser dette at suspensjonen inneholder flokkulerende partikler. Når

suspensjonens gjennomsnittlige synkehastighet øker med tiden på et bestemt dyp, betyr det at de finfordelte partikler som synker langsomt, slår seg sammen og danner større partikler som synker hurtigere. Når «skyen» av de hurtig synkende partiklene har passert målepunktet, vil den gjennomsnittlige sedimenteringshastighet avta, for suspensjonene inneholder da mer langsom synkende partikler på det aktuelle dyppet. Maksimalverdiene i hastighetsdiagram viser derfor at suspensjonen inneholder flokkulerende partikler. Dersom kurvene ikke har noen maksimalverdier, som i figur 4, inneholder ikke suspensjonen partikler som flokkulerer under sedimenteringsprosessen.



Figur 3.

Hastighetsdiagrammet viser den gjennomsnittlige synkehastighet for aluminiumhydroksyd som funksjon av sedimenteringstid. Økningen i partiklenes synkehastighet i løpet av de første 10 minutter viser at partiklene flokkulerer.



Figur 4.

Diagrammet viser synkehastighet for mineralske partikler i flotasjonsavgang. Partiklenes synkehastighet øker når den opprinnelige partikkelkonsentrasjon heves fra 1% til 5% tørrstoff.

Sedimenteringshastighet for aluminiumhydroksyd

Aluminiumsulfat er et av de vanligste fellingskemikalier i vannrensaneanlegg. Voluminøse flokker som består av partikulært aluminiumhydroksyd, dannes når pH justeres til 5,5–7,0. Fnokkene fjerner både løste og partikulære forurensninger fra vannfasen ved at de bunnfelles. Sedimenteringshastigheten for denne type fnokker er undersøkt etter SUSPEN-metoden.

Testen ble utført med en løsning som inneholdt 50 mg Al/l i form av aluminiumsulfat. Natriumhydroksyd ble tilsatt under omrøring i sedimenteringsrøret inntil pH var 6,5. Suspensjonene besto av en heterogen blanding av små og store

fnokker som sank med forskjellig hastighet.

Figur 3 viser at suspensjonens gjennomsnittlige synkehastighet først øker for deretter å avta med sedimenteringstiden. Maksimalverdiene forteller at suspensjonene inneholder flokkulerende partikler. Under flokkuleringen slår de små partikler seg sammen og danner større partikler som samlet synker hurtigere enn de opprinnelige partiklene. Hastigheten øker dessuten med dyppet i sedimenteringsrøret og skyldes at fnokkene vokser under sedimenteringsprosessen.

Sedimenteringshastigheten var maksimal etter ca. 10 minutters sedimentering. McLaughlin (1959) fant også at partiklene i en suspensjon som besto av aluminiumsulfat og bentonitt hadde maksimal sedimenteringshastighet etter 10—12 minutter. Figur 3 viser at den maksimale sedimenteringshastighet var ca. 0,9 cm/min. I McLaughlins undersøkelser var den maksimale sedimenteringshastighet på det tilsvarende dyp ca. 1,8 cm/min. Dette tyder på at tilsetningen av bentonitt fordoblet partiklenes gjennomsnittlige sedimenteringshastighet.

Sedimenteringshastighet for mineraliske partikler (flotasjonsavgang)

Ved selektive flotasjonsprosesser skilles de verdifulle mineralene fra råmalmen, og avfallsstoffene (avgang) deponeres som regel i vann. Avgangen fra slike flotasjonsprosesser består av en heterogen blanding av små og store partikler. SUSPEN-metoden er brukt for å beskrive synkeegenskapene til disse avgangspartiklene ved partikkelkonsentrasjoner på 1% og 5% tørrstoff. Testene ble utført samtidig i to sedimenteringsrør. Innholdet av suspen-

dert stoff ble analysert i prøvene uttappet fra sedimenteringsrøret.

Resultatene (Figur 4) viser at den gjennomsnittlige sedimenteringshastighet i løpet av de første 30 minutter ble omtrent fordoblet når den opprinnelige partikkelkonsentrasjonen økte fra 1% til 5%. En økning av den opprinnelige konsentrasjon av denne type partikler vil, innenfor visse grenser føre til en hurtigere sedimentering av partiklene i løpet av den første del av sedimenteringsprosessen. Når suspensjonen blir mer fortennet og partiklenes størrelse og synkehastighet avtar er suspensjonene sedimenteringshastighet i mindre grad påvirket av den opprinnelige partikkelkonsentrasjon og kurvene i figur 4 nærmer seg derfor hverandre. En økning av vannets saltinnhold vil imidlertid kunne føre til en raskere sedimentering av de minste partiklene i suspensjonen.

Summary

The settling velocity of a suspension containing fine particles can be described quantitatively by settling tests and calculations based on the continuity equation. The method includes analyses of particle concentration at various depths in a quiescent water column during the settling process. Calculations are performed by the computer program SUSPEN, and the local mean settling velocity is presented as a function of depth and time. The method is experimentally simple, and requires no data about particle density, particle shape, form, viscosity of water, etc. In principle, the method is applicable to all different kinds of suspensions containing slowly settling particles.

Henvisninger

- McLaughlin, R. T. jr.*: «The settling properties of suspensions.» Jour. of the hydraul. div., ASCE, Vol. 85, No HY 12, Proc. paper 2311, Dec. 1959, pp. 9—41.
- Miller, D. G.*, 1964: «Sedimentation. A review of published work.» Water and Water Engineering, Febr. pp. 52—58.
- O'Melia, C. R.*, 1980: «Aquasols: The behavior of small particles in aquate systems.» Environmental Sci. Technol., Vol. 14, No. 9 pp. 1052—1060.
- Tryland, Ø. og Støren, E.*, 1978: «Sedimenteringshastighet til suspensjoner. Metodikk og databehandling.» NIVA-rapport, D1—04, Oslo, 14.2. 1978.
- Vanoni, V. A.* (Editor), 1975: «Sedimentation Engineering.» ASCE Manual No. 54, New York.