

Rask transport av forurensning til grunnvannet via foretrukne strømningsveier

Av Nils-Otto Kitterød

Nils-Otto Kitterød er ansatt ved
Institutt for geologi og geofysikk, Universitetet i Oslo

Innlegg på seminar 8. juni 2000

Innledning

Gjennom forskningsprogrammet Miljø i grunnen - faneprojekt Gardermoen, har det gjentatte ganger blitt dokumentert hvor effektivt mikroorganismene i undergrunnen bryter ned både avsningskjemikalier (glykol, urea, acetat og formeat) og flydrivstoff (Swensen, 1997a; Breedveld et al., 1997; French, 1999; Alfnes et al., 2000; Søvik et al., 2000. For lett tilgjengelig informasjon se Aagaard, 1999). Disse resultatene står fast, og alt tyder på at den jordbaserte rensningen på Gardermoen fungerer etter intensjonen. Likevel kommer det ikke som noen overraskelse at selv lett nedbrytbare kjemikalier detekteres i grunnvannet på Gardermoen fra tid til annen. Årsaken er transport langs såkalte foretrukne strømningsveier. I grove avsetninger, slik vi finner på Gardermoen, kan "foretrukken strømming" (eller "preferential flow" på engelsk) resultere i meget rask transport gjennom markvannsonen. Dette har også blitt påpekt tidligere (Kitterød, 1997; Swensen 1997b). Mange av

de aktuelle kjemikalierne er vannløslige og vil følge med vannet på vei ned. Dersom transporten går for hurtig, vil ikke mikroorganismene ha tid nok til å bryte ned all forurensningen før den når grunnvannet. Tradisjonelt deler man foretrukken strømming inn i tre ulike mekanismer: i) fingring eller instabil strøm, ii) strømming i makroporer som f.eks røtter eller gravespor, og iii) traktstrømming. I denne lille artikkelen belyses hvorfor den siste transportmekanismen - traktstrømming, kan spille en viktig rolle på Gardermoen.

Før jeg tar for meg forholdene på Gardermoen spesielt, vil jeg referere litt fra internasjonal forskning innenfor dette området. På slutten av 80-tallet begynte man for alvor å bli oppmerksom på hurtig transport i umettet sone. Dette resulterte i en lang rekke sporstoff-forsøk som alle dokumenterte hvor viktig slike hurtige transportmekanismer er (Schulin et al. 1987, Hills et al., 1991, Roth et al., 1991, Flury et al 1994). Kung (1990ab; 1993) innførte begrepet "traktstrømming" (eller "funneling" på engelsk) og påviste i flere forsøk at det

tilsatte sporstoffet meget raskt ble konsentrert langs fine horisonter i sedimentet. Dette skjedde selv om sedimentet tilsynelatende var meget homogent. I et forsøk tilsatte han fargestoff på overflaten på to felt, hvert på 3.0 m x 3.6 m, og kartla deretter ved utgravning hvor fargestoffet ble transportert. I de øvre delene av sedimentet (fra 1.5-2.0 m) fylte fargestoffet ca. 50 % av sedimentet, mens fra 3.0-3.5 m utgjorde volumet kun 10 %. Roth et al. (1991) registrerte at selvom sporstoffet ble tilsatt kontinuerlig på overflaten, samlet sportstoffet seg raskt i usammenhengende felt i undergrunnen. Små mengder sporstoff ble registret på stort dyp kort tid etter at det ble tilsatt på overflaten. Foretrukken strømning ble observert når infiltrasjonskapasiteten overskred en terskelverdi. Fordi foretrukken strømning skjer over et meget begrenset volum, er det svært vanskelig å kvantifisere hvor viktig denne transportmekanismen er. Gjennom sine feltobservasjoner antyder likevel Roth et al. (1991) at mer enn 50% av sporstoffet kan bli transportert via slike transportmekanismer. Flury et al. (1994) gjennomførte en rekke sporstoff-forsøk på ulike jordarter i Sveits. De konkluderte med at transport langs foretrukne strømningsveier snarere er regelen enn unntaket.

Sporstoff-forsøk gjort på Gardermoen indikerer også at denne transportmekanismen er viktig der. Indirekte observasjoner bl.a. ved hjelp av georadar, tyder også på at traktstrøm er viktig i dette avsetningsmiljøet. Foreløpig har vi ikke greid å fastslå terskelverdier for når slik trans-

port inntreffer, og vi har heller ikke kvantifisert hvor stor andel som transporteres via foretrukne strømningsveier. For å komme fram til slike resultat er det ikke nok med punktobservasjoner, men man må foreta kontinuerlig overvåking av et tildels meget stort sedimentvolum. I praksis kan dette bare gjøres via indirekte målemetoder, noe som krever kostbare feltinnstillinger.

Løsmassene på Gardermoen

For å beregne hvordan markvannet og grunnvannet strømmer i en naturlig avsetning, er det viktig å forstå de geologiske prosessene som ligger bak. Løsmassene på Gardermoen utgjør et deltakompleks som ble avsatt da innlandsisen smeltet for ca. 10 000 år siden. Fordi dette skjedde uhyre raskt med voldsom vannføring og sedimenttransport, består avsetningen i dag av mye grovt materiale, særlig i områdene nærmest utløpet fra isbreen. Dette grove topplaget er mektigst i øst, nærmest breporten, og blir tynnere desto nærmere man kommer ravineområdene i vest og sør. Da det sedimentførende smeltevannet nådde fjorden, ble skrålagene avsatt. Disse består for det meste av sand med tydelig lagdeling. Fordi vannføringen har variert noe, og smeltevannsløpet endret posisjon på elvesletta, ble det også avsatt finere sedimenter i skrålagene. I disse fine lagene er det målt siltinnhold opp til 45%. Utenfor skrålagene, på den gamle fjordbunnen, ble de fineste sedimentene avsatt. Denne enheten som for det meste består av

silt og leire, kalles bunnlaget. Bunnlaget er mektigst lengst vekk fra den gamle breporten, d.v.s. det området som i dag er ravinelandskap i vest og sør. Til sammen gir dette en enkel begrepsmessig modell for avsetningen, bestående av fine bunnlag, sandige skrålager og øverst de grove topplagene.

Strømning i umettet sone

For å minke farene for forurensning av grunnvannet, er det viktig å forstå de geokjemiske og hydrologiske prosessene som finner sted i markvannet, d.v.s. den sonen som befinner seg mellom overflaten og grunnvannet. I dette området er porevolumet fylt av både gass og væske, i motsetning til grunnvannet som i praksis er mettet med vann. Under størstedelen av rullebanene på Gardermoen skjærer grunnvannspeilet gjennom skrålagerne slik det er illustrert i figur 1.

Hvis vi ser bort fra gassbevegelsen, kan strømning i umettet sone beskrives ved hjelp av Darcy's lov:

$$(1) \quad q = -k(\theta)(\partial\psi / \partial z + 1)$$

hvor k er hydraulisk ledningsevne [L/T] uttrykt som en funksjon av vanninnholdet θ , ψ er tensjon [L] mens z er den vertikale avstanden [L] til grunnvannspeilet (positiv z -akse oppover). Hvis vi ser på intense nedbørhendelser eller situasjonen under snøsmeltingen, og antar at disse infiltrasjonshastighetene overskrider kapasiteten til de siltige enhetene i skrålagerne, kan vi anta at vannmetningen i en be-

grenset utstrekning over de tettere horisontene nærmer seg full vannmetning. Hvilket innebærer at

$$(2) \quad \theta \rightarrow \theta_s, k(\theta) \rightarrow k_s \text{ og } \partial\psi / \partial z \approx 0$$

d.v.s. at vanninnholdet blir tilnærmet lik porøsiteten n , at den hydrauliske ledningsevnen nærmer seg mettet hydraulisk ledningsevne, og at vi kan neglisjere kapillærkreftene i den sonen som er mettet med fuktighet. Den eneste kraften som driver vannet nedover er med andre ord tyngden g . Fordi vannet transporteres mye lettere i sandlaget, kan vi kun regne med tyngdekomponenten i fallretningen, dvs. $g \cdot \sin\alpha$, hvor α indikerer størrelsen på fallet. Darcys lov kan dermed forenkles til:

$$(3) \quad q = -k_s \sin\alpha$$

Fordi vannet kun strømmer i poreåpningene, blir porevannshastigheten $v = q/n$. Dermed kommer vi fram til det meget enkle uttrykket for porevannshastigheten:

$$(4) \quad v = -k_s \frac{\sin\alpha}{n}$$

Like ved rullebanen på Gardermoen har vi målt fallet på skrålagerne α til ca. 14° , og porøsiteten n i sedimentene varierer fra 25-40%. Hvis vi for enkelhets skyld antar at $\sin\alpha \approx n$, blir $v \approx k_s$. Fra kornfordelingsanalyser basert på prøver fra skrålagerne på Gardermoen, vet vi at k_s ligger mellom 0.8 m/dag og 80 m/dag. Hvis dypet til grunnvannspeilet er ca. 5 m, vil transportveien langs fallet på skrålagerne bli ca. 25 m. Disse tallverdiene kan vi

sette inn i likning (4), og vi finner at oppholdstiden under disse forenklede forutsetningene kan variere fra mindre enn 1 dag til 1 måned avhengig av hvor stor ledningsevnen er i de vannførende lagene. Under ugunstige forhold er oppholdstider under 1 uke for kort tid til geokjemisk nedbrytning av store mengder avisningskjemikalier. Dette gjelder selv om deler av forurensningen passerer gjennom et aktivt jordfilter.

Risikoanalyse

Som antydnet ovenfor, er mesteparten av tilgjengelige informasjon om geologi, hydrologi og forurensningsfare i praksis svært vanskelig å kvantifisere helt nøyaktig. I tillegg er menneskelig aktivitet en viktig komponent i dette bildet. Det er derfor en stor utfordring å beregne risiki for mulige ulykker eller forurensningshendelser i slike situasjoner. Fordi klassiske statistiske metoder ikke er spesielt velegnet for slike beregninger, har det i Faneprojekt Gardermoen blitt utviklet en ny metodikk basert på begreper hentet fra "fuzzy logikk". I korthet går denne ut på å konstruere enkle matematiske regler basert på ekspertkjennskap til de fysiske og geokjemiske prosessene som inngår i en mulig forurensningsulykke. I dette konseptet kan også endret menneskelig adferd bakes inn. Et praktisk resultat av denne forskningen er geografiske kart som indikerer risiko for forurensning av grunnvannet ved ulike hendelser. For mer detaljer om dette arbeidet henvises det til Wong et. al, 2000.

Diskusjon

Er oppholdstider i umettet sone under en uke realistiske anslag? Jeg vil peke på to forhold som gjør slike anslag sannsynlige. Det ene gjelder infiltrasjon, det andre gjelder selve avsetningen.

Kravet om at vannbalansen i Gardermoen-området skal opprettholdes, innebærer at nedbør i form av både regn og snø alt vesentlig skal infiltreres i grunnen. Samtidig vet vi at infiltrasjonsarealet over store deler av Gardermoen er redusert p.g.a. tette asfalterte flater (rullebaner, veier, parkeringsplasser). Dette øker faren for at man skal få en "trakt-effekt" i umettet sone og dermed oppnå full vannmetning og dermed rask vanntransport. Faren for dette øker selvsagt dersom infiltrasjonsarealet reduseres ytterligere p.g.a. tette og isdannelse i løpet av vinteren.

Et tilsynelatende paradoks ved avsetningen på Gardermoen er at de fine siltholdige sedimentene i skrålagerne ikke fungerer som barrierer, men snarere som trakter. Fordi disse fine sedimentene er omgitt av grovere sandlag, kan dette ytterligere øke faren for hurtig transport gjennom umettet sone.

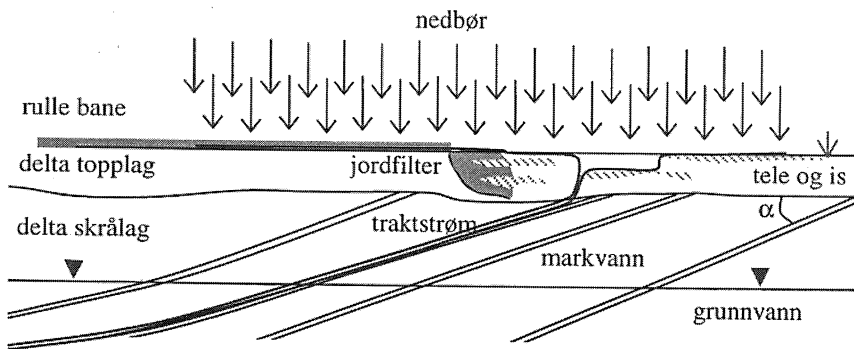
Et viktig poeng med en slik trakt-effekt er selvsagt at overvåkningsbrønner både i markvann- og grunnvannsonen, må treffe disse vannførende horisontene for å gi et bilde av hvor god rense-effekten i virkeligheten er både i jordrenseanlegget og i umettet sone forøvrig. Det vil alltid være vanskelige avveininger hvor slike overvåkningsbrønner skal plasseres, og faren for at man ikke

treffer de heteste punktene er alltid til stede.

Overskriften på dette seminaret var "Grunnvannsressuresen på Gardermoen - brukerinteresser og konflikter". Noe av bakgrunnen for seminaret var Oslo Hovedflyplass' (OSL) ønske om å få muligheten til å øke utslippene av avsningskjemikalier for å bedre trafikksikkerheten vinterstid. Etter min mening fortjener OSL honnør for et høyt ambisjonsnivå når det gjelder å minimalisere farene for grunnvannsforurensning. Fordi effekten av foretrukket strømning i umettet sone fortsatt er uklar, og fordi det fortsatt er usikkerhet om hvordan eventuelle tilsetningstoffer i avsningskjemikalierne opptrer i miljøet, bør føre var prinsippet legges til grunn når man skal ta stilling til økte utslipp. I denne sammenhengen bør dette prinsippet innebære vitenskapelige forsøk som kan bekrefte (eller avkrefte) at kjemikalierne ikke har skadelig effekt på lang sikt.

Referanser

- Alfnes E., Aagaard P., Kinzelbach W., Flow, transport and biodegradation of jet fuel contaminated water in the unsaturated zone. Part 2, Simulation of field experiments, in Bjerg, P.L., Engesgaard, P. & Krom, Th. D. (eds) Groundwater 2000, 323-324, 2000
- Breedveld G.D., Olstad G., Aagaard P., Treatment of Jet Fuel-Contaminated Runoff Water by Subsurface Infiltration. Bioremediation Journal, v.1, p.77-88, 1997
- Flury M., Flühler H., Jury W.A., Leuenberger J., Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study, Water Res. Res. 30(7) 1945-1954, 1994
- French H.K., Transport and Degradation of Deicing Chemicals in a Heterogeneous Unsaturated Soil, Ph.D. thesis, Department of Soil and Water Sciences, The Norwegian Agricultural University, 2000
- Hills R.G., Wierenga P.J., Hudson D.B., Kirkland M.R., The second Las



Figur 1. Prinsippskisse som illustrerer mulig trakstrømning under rullebanen på Gardermoen.

- Cruces trench experiment: Experimental results and two-dimensional flow predictions, *Water Res. Res.* 27(10) 2707-2718, 1991
- Kitterød N.-O., Stochastic Estimation and Simulation of Heterogeneities Important for Transport of Contaminants in the Unsaturated Zone, Ph.D. thesis, University of Oslo, Institute of Geophysics, 1997
- Kung K.-J.S., Preferential flow in a sandy vadose zone: 1. Field observations, *Geo-derma*, 46, 51-58, 1990a
- Kung K.-J.S., Preferential flow in a sandy vadose zone: 2. Mechanism and implications, *Geoderma*, 46, 59-71, 1990b
- Kung K.-J.S., Soil processes and chemical transport, laboratory observation of funnel flow mechanism and its influence of solute transport, *J. Environ. Qual.* 22:91-102, 1993
- Roth K., Jury W.A., Flüher H., and Attinger W., Transport of chloride through an unsaturated field soil, *Water Res. Res.* 27(10), 2533-2541, 1991
- Schulin, R., van Genuchten M.Th., Flüher H., and Ferlin P., An experimental study of solute transport in a stony field soil, *Water Res. Res.* 23(9), 1785-1794, 1987
- Swensen B., Transport processes and transformation of Urea-N in the unsaturated zone of a heterogeneous, mineral sub-soil, Ph.D. thesis, Department of Soil and Water Sciences, The Norwegian Agricultural University, 1997a
- Swensen B., Unsaturated Flow in layered, glacial-contact delta deposit measured by the use of ^{18}O , C_2 and Br^- as tracers, *Soil Science* (162) 4, 242-253, 1997b
- Sjøvik A. K., Alfnes E., Aagaard P., Breedveld, G.D., Flow, transport and biodegradation of jet fuel contaminated water in the unsaturated zone. Part 1, Field experiments at the Moreppen site, Gardermoen, Norway, in Bjerg P.L., Engesgaard P. & Krom Th. D. (eds) *Groundwater 2000*, 343-344, 2000
- Wong W.K., Krasovskaia I., Gottschalk L., Bárdossy A., Risk mapping of groundwater contamination. In: *Hydrological Models for Environmental Management*, Eds. Moore, R.J., Gottschalk, L., Bolgov, M.V. (in press), 2000
- Aagaard P., Miljøforums hjemmeside om Gardermoprosjektet: <http://www.uio.no/miljoforum/natur/grvann/prosjekt.shtml>, 1999