

# Grunnvannsforsyning fra løsmasser som hygienisk barriere – styrker og svakheter i et klima i endring

Av Hanne M. L. Kvitsand og Stein W. Østerhus

Hanne M. L. Kvitsand er Ph.D.-student ved institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, og Asplan Viak AS. Stein W. Østerhus er professor ved institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU.

Innlegg (bearbeidet versjon) på fagtreff i Norsk vannforening 25. mars 2014.

## Summary

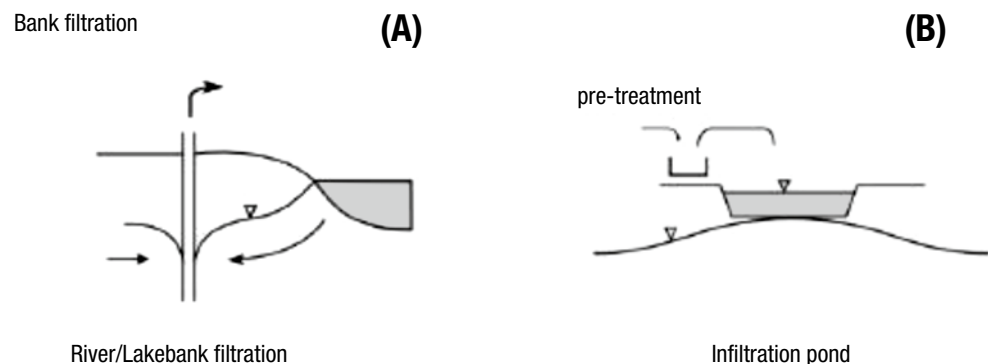
**Groundwater supply from unconsolidated sediments as a hygienic barrier – strengths and weaknesses in a changed climate.** Many Norwegian municipalities have drinking water supply based on groundwater abstraction from wells in aquifers that are hydraulically connected to a surface water source. The pumping action from these wells induces surface water to flow downwards through the porous media and into the well field (i.e. bank filtration), thus increasing the abstraction capacity and improving hygienic quality of infiltrating surface water. However, infiltration of surface water also increases the risk of groundwater contamination. Future climate changes are expected to increase the risk of waterborne disease outbreaks. This article summarizes some of the consequences of projected climate changes in Norway on the natural hygienic barriers at groundwater supply from unconsolidated sediments. Unlike our neighbouring country Sweden, there is still a lack of cost estimates and quantitative estimates of climate impacts in terms of groundwater supply in general in Norway. The purpose of this article is to present the status of our knowledge and based on the expected climate changes advise that maintain a hygienic good groundwater supply in the future.

## Sammendrag

En rekke norske kommuner har drikkevannsforsyning basert på grunnvannsuttag fra rørbrønner i løsmasser, der grunnvannet står i hydraulisk kontakt med en overflatevannkilde. Ved pumping fra slike brønner induseres overflatevann til å strømme inn mot brønnfeltet, noe som gir økt uttakskapasitet og en forbedring av kvaliteten på infiltrasjonsvannet. Innstrømning av overflatevann gir imidlertid også økt fare for forurensning av grunnvannet. Denne artikkelen oppsummerer noen av konsekvensene et forventet varmere, våtere og villere klima vil ha for den naturlige hygieniske barrieren ved grunnvannsforsyning fra løsmasser i Norge. I motsetning til vårt naboland Sverige, mangler fremdeles kostnadsberegninger og kvantitative estimeringer av klimakonsekvensene når det gjelder grunnvannsforsyning generelt i Norge. Formålet med artikkelen er å gi en oppdatering av eksisterende kunnskapsnivå og ut fra forventede klimaendringer gi råd som opprettholder hygienisk god grunnvannsforsyning også i fremtiden.

## Innledning

I Norge er det forventet at fremtidige klimaendringer vil gi i) økt temperatur, ii) økt nedbør og iii) mer ekstremvær (Hanssen-Bauer et al. 2009). Disse faktorene kan påvirke den mikrobielle kvaliteten av drikkevann i negativ retning, og øke faren for vannbårne sykdomsutbrudd (Schijven



Figur 1. Eksempler på induisert infiltrasjon (A) og kunstig infiltrasjon (B) av overflatevann (Hannapel et al. 2014).

og Husman 2005, Tryland et al. 2011, Fonahn 2014).

Betydningen av drikkevann som årsak til næringsmiddelbårne infeksjoner er trolig større i Norge enn i andre industriland, blant annet på grunn av utbredt bruk av overflatevann (MD 2013). Grunnvann er på grunn av omkringliggende løsmasser bedre beskyttet mot effektene av direkte forurensningsutslipp enn overflatevannkilder, og er foretrukket råvannskilde i en rekke land (Smeets et al. 2009). Et varmere, vilkere og våtere klima vil imidlertid kunne påvirke både mengde og kvalitet ved grunnvann. Selv om klimaendringer forventes å ha stor innvirkning på drift og hygienisk sikkerhet i norsk vannforsyning i fremtiden (Bomo og Tryland 2011), er det hittil rettet liten oppmerksomhet mot konsekvensene av klimaendringer med hensyn til grunnvannsforsyning i Norge. Ei heller er det viet særlig fokus mot hvorvidt løsmassefiltrering kan utgjøre et framtidig supplement til dagens praksis med konvensjonell vannbehandling av overflatevann her til lands.

Denne artikkelen omhandler hygienisk barriereeffekt ved grunnvannsforsyning fra akviferer i sand- og grusavsetninger, som i dag utgjør ca. 9 % av drikkevannsforsyningen fra meldepliktige<sup>1</sup> norske vannverk (Myrstad et al. 2014).

<sup>1</sup> Meldepliktige vannverk: vannforsyninger som forsyner minst 50 fastboende personer eller minst 20 husstander, og som er pliktige å innrapportere vannverksdata til vannverksregisteret (Myrstad et al. 2014).

Sand- og grusavsetninger i Norge er ofte av begrenset mektighet og utstrekning. Rørbrønner i løsmasser plasseres derfor gjerne i nærheten av en elv eller innsjø for å øke uttakskapasiteten. Dersom vannstanden i overflatevannkilden er høyere enn grunnvannsstanden, vil overflatevann strømme inn i grunnen og «mate» grunnvannet. Dette kan forekomme naturlig, eller induseres ved at grunnvannsuttaget senker grunnvannsspeilet i en slik grad at trykkgradienten blir stor nok til å inducere strømning av overflatevann ut av elva/innsjøen og inn i grunnen (engelsk: bank filtration), figur 1A (Hannapel et al. 2014). Denne typen grunnvannsuttag er svært viktig for vannforsyningen i mange små- og mediumstore kommuner i norske dalfører (Banks et al. 1998, Knutsson 2008). Infiltrasjon av overflatevann kan også skje kunstig, ved at overflatevann pumpes opp i basseng, grøfter eller infiltrasjonsbrønner og på denne måten bidrar til kunstig grunnvannsdannelse, figur 1B. Denne metoden er hittil lite benyttet i Norge, og har trolig et uutnyttet potensial her til lands. Brønnvannet vil både ved induisert og kunstig infiltrasjon bestå av en blanding av stedegent grunnvann og løsmassefiltrert overflatevann (Ray 2002).

I Norge anses induisert infiltrasjon av overflatevann hovedsakelig som et kapasitetsøkende tiltak for grunnvannsbrønner, mens det internasjonalt rettes større fokus mot metodens kapasitet til å forbedre vannkvalitet (Hannapel et al.

2014). Indusert infiltrasjon av overflatevann er særlig egnet til å redusere innholdet av naturlig organisk materiale (NOM), organiske forurensninger og smittestoffer som finnes i overflatevann, samt til å utjevne konsentrasjonsvariasjoner (Tufenkji et al. 2002, Weiss et al. 2005, Dash et al. 2008, Sprenger et al. 2009). Det finnes imidlertid også utfordringer knyttet til infiltrasjon av overflatevann. Uønskede effekter på vannkvalitet kan være økt hardhet, økte konsentrasjoner av nitrat, jern og mangan, samt dannelsen av hydrogensulfid og andre svovelforbindelser som gir lukt på grunn av redoks-forhold i grunnen (Hiscock og Grischek 2002). Med tilstrømning av overflatevann inn i akviferen øker også faren for at forurensning tilføres grunnvannet og brønnområdet dersom oppholdstiden i grunnen ikke er lang nok. En av de største utfordringene med uttak av grunnvann fra løsmasser i Norge er derfor knyttet til bruken av overflatevannpåvirket grunnvann uten desinfeksjon (Kvitsand og Fiksdal 2010).

Gjeldende drikkevannsforskrift stiller krav om at alle norske vannforsyningssystem skal ha minst to uavhengige hygieniske barrierer, hvorav minimum én av barrierene skal eliminere mikrobielle smittestoffer på en slik måte at de ikke lenger utgjør noen helsefare (SHD 2001). I Norge er det foreløpig kun registrert vannbårne sykdomsutbrudd som følge av mikrobiell forurensning av drikkevannet; det er ikke registrert utbrudd i tilknytning til fysiske komponenter eller kjemisk forurensning (Kvitsand og Fiksdal 2010, Nygård et al. 2003). Det er derfor rettet størst fokus mot mikrobielle barrierer i vannforsyningssystemet, som også er fokus for denne artikkelen. Det er imidlertid viktig å huske at begrepet hygieniske barrierer også omfatter tiltak for å hindre at helseskadelige kjemiske og fysiske stoffer opptrer i drikkevannet. Følgende tema berøres i denne artikkelen: Grunnvannsforsyning i Norge, mikrobiell barriereeffekt ved grunnvannsuttag fra løsmasser, effekter av klimaendringer på barriereeffekten, og fremtidig forskningsbehov. Formålet med artikkelen er å gi en status for kunnskapsnivå og ut fra forventede klimaendringer gi råd som opprettholder en

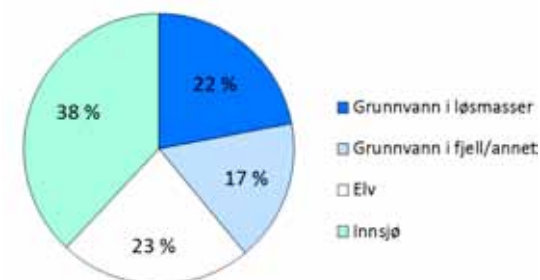
hygienisk god grunnvannsforsyning også i fremtiden. Innholdet i artikkelen er basert på litteraturgjennomgang av nyere internasjonal litteratur.

## Grunnvannsforsyning i Norge

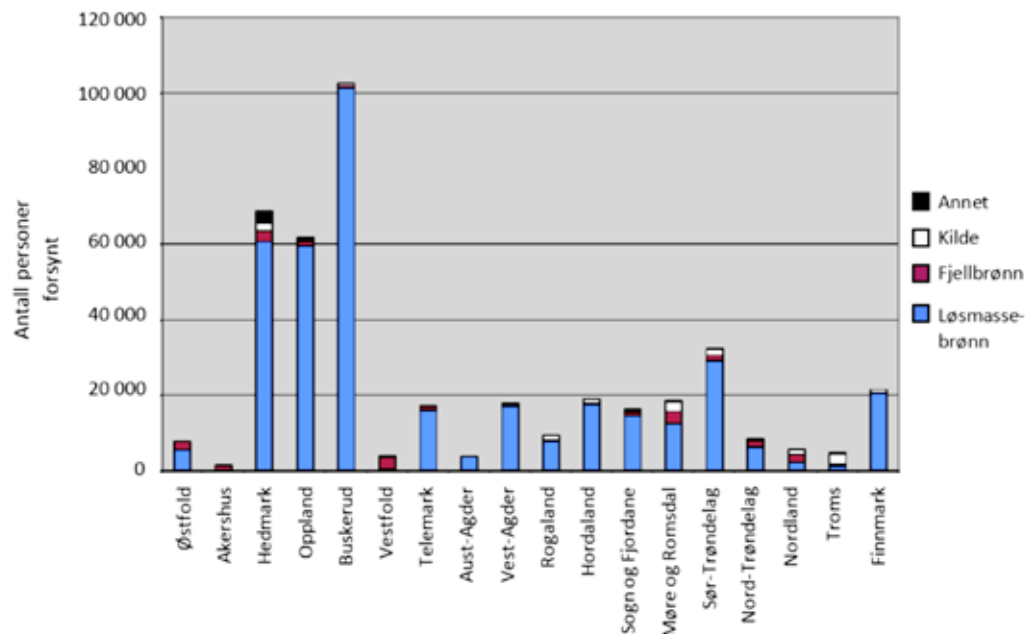
Grunnvann har vært brukt som drikkevannskilde i Norge i århundrer i form av kilder og gravde brønner til små forsyninger. De første norske borebrønnene i fjell ble boret på øyer i Vesterålen i 1890-årene (NGU 1992), og siden den gang er det boret mer enn 100 000 brønner i fjell. Fjellbrønnene forsyner hovedsakelig enkelt- og gårdsbruk, hytter eller mindre fellesvannverk (Morland 1996), og benyttes i dag også til uttak av grunnvarme. Det er i tillegg registrert tre store (> 350 000 m<sup>3</sup>/år) vannverk med grunnvann fra borebrønner i fjell i Vannverksregisteret (VREG) hos Mattilsynet. Disse er Brumunddal, Værøy og Rakkestad vannverk (www.grunnvanninorge.no).

De første vertikale rørbrønnene i løsmasser for større vannforsyninger i Norge ble etablert i 1950-årene (NGU 1992). I dag finnes ca. 280 meldepliktige vannverk med grunnvannsuttag fra løsmasser (Myrstad et al. 2014), hvorav de aller fleste er basert på induert infiltrasjon av overflatevann. Denne typen vannforsyning er svært viktig for små og mellomstore tettsteder (Knutsson 2008), men også for større byer som Hønefoss, Lillehammer og Elverum (20-30 000 innbyggere), Alta, Kongsberg, Kongsvinger og Voss (10-20 000 innbyggere) (www.grunnvanninorge.no).

Figur 2 viser vannkildedefordeling med hensyn til andelen meldepliktige vannverk i Norge. Av vannverkene som rapporterer til VREG, har til



Figur 2. Vannkildedefordeling med hensyn til andelen meldepliktige vannverk for 2010 (data fra Myrstad et al. 2014).



Figur 3. Fylkesvis fordeling av antall personer forsynt av de ulike grunnvannskildene i 2010 (Myrstad et al. 2014).

sammen 61 % av vannverkene overflatevann (innsjø/tjern og elv/bekk) som kilde, mens 39 % av vannverkene har grunnvann (fra løsmasser eller fjell) som vannkilde. Mens overflatevannverkene forsyner 90 % av den forsynte befolkning, forsyner vannverkene med grunnvann de resterende 10 %. Dette indikerer at vannverk som er knyttet til grunnvannskilder er små vannverk (Myrstad et al. 2014).

Figur 3 viser hvordan antallet personer forsynt av de ulike grunnvannskildene fordeler seg fylkesvis. Med unntak av Akershus og Vestfold, fremkommer tydelig at det er grunnvann fra løsmassebrønner som dominerer i alle fylker som har grunnvannsforsyning (Myrstad et al. 2014).

### Mikrobiell barriereeffekt ved grunnvannsutttak fra løsmasser

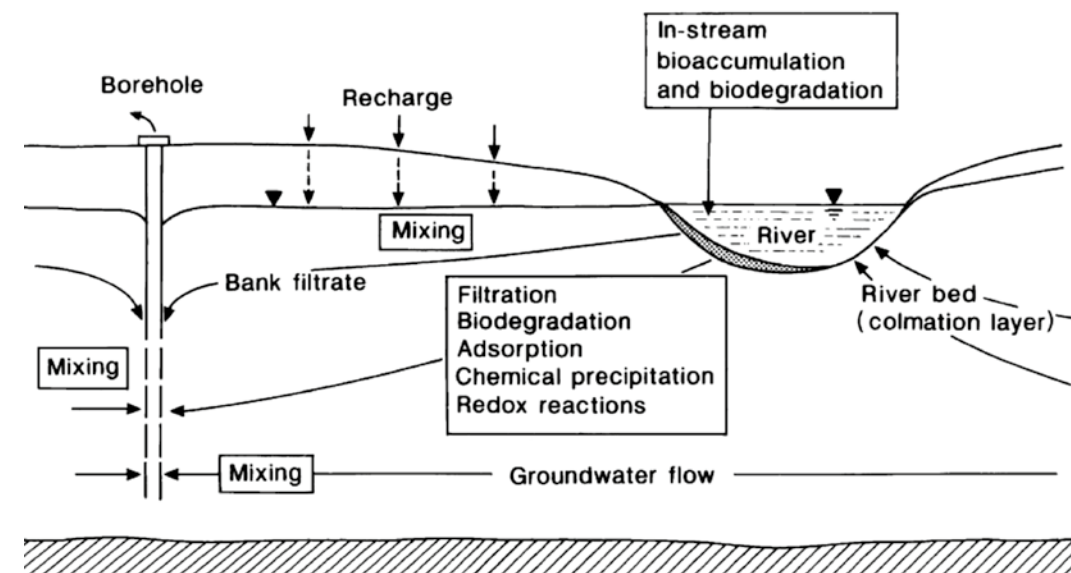
Vannbårne smittestoffer er som regel av fekal opprinnelse, det vil si at de tilføres naturmiljøet og vannkildene via utslipp av ekskrementer fra dyr og mennesker. Det er prinsipielt sett to ulike måter å hindre at de mikrobielle smittestoffene spres gjennom drikkevannet:

- Hindre at de tilføres drikkevannskilden
- Fjerne/ødelegge dem ved vannbehandling.

I det følgende gis en kort innføring i prinsippene bak barriereeffekter ved grunnvannsutttak fra løsmasser, som er oppsummert i figur 4. For generell informasjon om hygieniske barrierer ved beskyttelse av vannkilden og ved konvensjonell vannbehandling, henvises til følgende litteratur:

- Vannforsyningens ABC (Nasjonalt Folkehelseinstitutt 2004, 2008),
- Vannkilden som hygienisk barriere (overflatevann) (Hem et al. 2008),
- Verktøy for vurdering av vannkilden som barriere. Grunnvann i fjell (Gaut 2008),
- Veiledning til bestemmelse av god desinfeksjonspraksis (Ødegaard et al. 2009),
- Veiledning til drikkevannsforskriften (Mattilsynet 2011).

Verktøyet for bestemmelse av god desinfeksjonspraksis (Ødegaard et al. 2009) er nylig revidert, og vil i 2014 gis ut under navnet Mikrobiell Barriereanalyse (MBA).



Figur 4. Prosesser som innvirker på vannkvalitet ved industert infiltrasjon (bank filtrasjon) (Hiscock og Grischek 2002).

### Mikrobiell beskyttelsessone

God klausulering med tilstrekkelige arealrestriksjoner er nødvendig for å hindre tilførsel av forurensning til grunnvannbrønner. For beskyttelse mot mikroorganismer benyttes en oppholdstid på 60 døgn som et mål for lengden på den mikrobielle beskyttelsessonen mellom en potensiell forurensningskilde og produksjonsbrønner. I veiledningen til gjeldende drikkevannsforskrift (Mattilsynet 2011) regnes denne oppholdstiden som tilstrekkelig for å inaktivere virus og bakterier, og sidestilles med konvensjonell vannbehandling som eliminerer smittestoffer. En hygienisk barriere regnes i denne sammenhengen som 3 log-reduksjon av virus- og bakteriekonsentrasjon og 2 log-reduksjon av parasittkonsentrasjon (Mattilsynet 2011).

Oppholdstiden på 60 døgn er basert på forskning utført på 1930-tallet av Knorr, som i sine studier viste at denne oppholdstiden var tilstrekkelig for å unngå gjennombrudd av *Escherichia coli* i uttaksbrønn ved elveinfiltrasjon (Knorr 1937, van der Wielen et al. 2008). Knorr selv påpekte imidlertid at det var usikkert hvorvidt denne oppholdstiden var tilstrekkelig mht.

virusfjerning (Knorr 1937), da virus overlever lengre i grunnvann enn de fleste bakterier. Nyere forskning i Nederland har siden vist at 50 – 60 døgn er tilstrekkelig for virusfjerning i oksiske akviferer, men at det for anoksiske akviferer kreves dobbelt så lang oppholdstid på grunn av lavere adsorpsjonsrater i sistnevnte (van der Wielen et al. 2008). Undersøkelser ved to vannverk med industert infiltrasjon og oksiske forhold i Sør-Trøndelag viste at 3 log-reduksjon av virus- og bakteriekonsentrasjon kan oppnås ved normalvannstand selv ved oppholdstider som er kortere enn de anbefalte 60 døgn (Kvitsand et al., in prep). Undersøkelsene viste imidlertid også at virus kan forekomme i grunnvannet uten påvisning av indikatorbakterier, og motsatt (begge disse anleggene har permanent desinfeksjon).

De fleste grunnvannsmagasiner som benyttes til drikkevannsforsyning i Norge er oksiske, men anoksiske forhold kan forekomme lokalt. På grunn av begrenset utstrekning av norske sand- og grusavsetninger er imidlertid oppholdstiden til infiltrerende overflatevann i mange tilfeller kortere enn de anbefalte 60 døgn.

Oppholdstiden kan også variere, avhengig av vannstand og nedbørsforhold. Det samme gjelder kvaliteten på infiltrerende overflatevann. Likevel forsyner mange grunnvannsanlegg drikkevann uten permanent desinfeksjon, ettersom det sjelden påvises fekale indikatorbakterier i grunnvannsbrønnene. Fravær av indikatorbakterier er et godt tegn, men er ingen garanti for smittefritt vann på grunn av forskjeller i overlevelse, størrelse og morfologi hos de ulike mikroorganismene (Pedley et al. 2006). Dette blir nærmere omtalt i det følgende avsnittet.

**Prinsipper for mikrobiologisk barrierevirkning i løsmasseakviferer**

Tilbakeholdelse og inaktivering/utdøing er to viktige prinsipper som ligger til grunn for mikrobiologisk barrierevirkning ved all vannbehandling. Aller helst skal begge disse prosessene inkluderes ved behandling av drikkevann (Mattilsynet 2011), noe de gjør ved grunnvannsutttak fra løsmasser. Begge mekanismene er essensielle ved etablering av mikrobielle beskyttelsessoner rundt grunnvannsanlegg.

Tilbakeholdelse av mikroorganismer i et porøst materiale skjer ved filtrering og siling (engelsk: straining). Hvorvidt filtrering eller siling inntreffer avhenger av størrelsen på mikroorganismen i forhold til porestørrelsen på filtermaterialet. Ved siling gjensettes mikroorganismene (eller andre partikler) i porer i filtermassen som er så små at smittestoffene holdes tilbake. Geometrisk modellering har vist at siling kan bidra til tilbakeholdelse i løsmasser og annet filtermedium dersom forholdet mellom størrelsen til mikroorganismen (partikkel) og løsmassekorn (kollektor) ( $d_p/d_k$ ) er større enn 0,05 (Sakthivadivel 1966, 1969 i Hijnen et al. 2010). Observasjoner fra laboratorieforsøk, derimot, har vist at siling opptrer ved lavere terskelverdier (0,005-0,008) (Xu et al. 2006, Bradford et al. 2004 i Hijnen et al. 2010). Tatt i betraktning smittestoffenes størrelse (virus: 0,02 – 0,2 µm; bakterier: 1 – 2 µm; parasitter: 4 – 14 µm) og vanlig diameter på sand og grus i norske akviferer (0,5 – 1mm), vil siling kunne bidra til tilbakeholdelse av parasitter og til dels av bakterier, men svært lite til-

bakeholdelse av virus. Unntaket er i akviferer med heterogene masser med stor andel av silt og leir.

Filtrering betegner prosesser der poreåpningene i filtermassen er så store at mikroorganismer ikke fjernes fra vannfasen ved gjensetting i små poreåpninger, men gjennom kollisjoner med og avsetning på overflaten til materialet i det porøse mediet. Filtrering beskrives av kolloidfiltreringsteori (engelsk: colloid filtration theory; CFT), og inkluderer både massetransport (adveksjon, dispersjon, diffusjon og sedimentering) og interaksjon mellom mikroorganisme og løsmassekorn (hydrofobe interaksjoner, kinetisk adsorpsjon og likevektsadsorpsjon) (Schijven og Hassanizadeh 2000). I følge CFT vil virus og parasitter i større grad holdes tilbake i et porøst medium sammenlignet med bakterier på grunn av størrelsesforskjeller. Dette skyldes at kolloider i størrelsen 1 – 2 µm (bakterier) i mindre grad utsettes for brownske bevegelser og diffusjon enn mindre kolloider (virus), og mindre grad av sedimentering sammenlignet med større kolloider (parasitter) (Gupta et al. 2009). Som et resultat av dette er sjansen for bakteriell kollisjon og tilbakeholdelse til løsmasser lavere for bakterier enn for både virus og parasitter, noe som kan medføre større risiko for bakteriell vannbåren smitte enn for de to øvrige smittestoffgruppene. På den andre side vil bakterier generelt dø ut raskere i kaldt, mørkt og næringsfattig vann som grunnvann sammenlignet med de mer resistente virusene og parasittene.

Siling og filtrering vil typisk fremmes dersom grunnvannet har lav transporthastighet og lang oppholdstid (kontakttid), høyt innhold av silt og leir med ladde overflater (høyt finstoffinnhold reduserer imidlertid uttakskapasiteten), utfelling av hydroksider på sand- og gruskorn, høy ionestyrke, lavt innhold av organisk materiale og lav pH (Pedley et al. 2006). Fjerning av smittestoffer fra drikkevann gjennom tilbakeholdelse i løsmasser er dermed en svært stedsspesifikk prosess, som vil variere både mellom ulike typer smittestoffer og ulike hydrogeologiske miljø.

Når fekale vannbårne smittestoffer kommer ut i naturmiljøet vil de utsettes for et miljø som

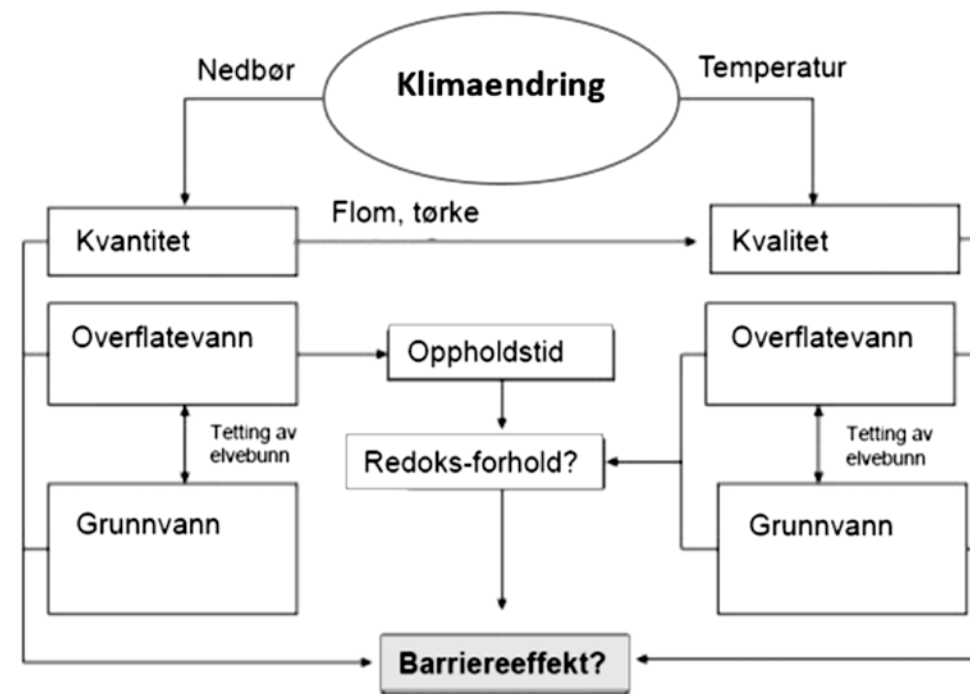
er forskjellig fra sitt vante miljø i tarmen, blant annet eksponering i sollys, luft, og stedege (autoktone) mikroorganismer. Disse faktorene kan resultere i at proteinkappen som omslutter DNA/RNA i virus ødelegges (jmfør cellemembran hos bakterier, (oo)cyste hos protozoiske parasitter) og/eller direkte ødeleggelse av selve replikasjonsmaterialet (Jin og Flury 2002). Avhengig av mikroorganismenes resistens mot det ytre stress, vil de til slutt dø ut/inaktiveres i naturmiljøet. De finnes da fremdeles i vannfasen men har mistet sin sykdomsfremkallende effekt (virulens). Både virus og parasitter overlever lengre i vannmiljø enn bakterier. Virus har i tillegg en størrelse som er 1/10 – 1/1000 av størrelsen til parasitter, og er derfor ansett som det mest kritiske smittestoffet i grunnvannssammenheng (Schijven og Hassanizadeh 2000).

Faktorer som vanligvis bidrar til forlenget overlevelse av smittestoffer i naturmiljøet er lav vanntemperatur, vannmettede forhold, ingen eksponering mot sollys, nøytral pH, adsorpsjon til løsmasser og lavt innhold av mikrobielle pre-

datorer (Pedley et al. 2006). Inaktiveringsraten i «typisk norsk» grunnvann (nøytral pH, temperatur mellom 5 – 10 grader, ionefattig, lavt innhold av organisk materiale) vil dermed være lav. For virus er den antakelig lavere enn 0,04 log/dag, basert på internasjonal litteratur (John og Rose 2005). Dette betyr at det i løpet av en oppholdstid på 60 døgn antagelig oppnås mindre enn 3 log reduksjon ved inaktivering, og at resterende må fjernes ved adsorpsjon til løsmassene for å oppnå 1 mikrobiell barriere.

**Klimafaktorer som påvirker barriereeffekt ved grunnvannsutttak fra løsmasser**

Et varmere, villere og våtere klima vil påvirke de naturlige renseprosessene som foregår i grunnen. Endring i både temperatur og nedbør gir direkte endringer i både mengde og kvalitet på overflatevannkilder og grunnvannskilder, og derigjennom en indirekte innvirkning på både uttakskapasitet og vannkvalitet ved grunnvannsutttak fra løsmasser, figur 5.



Figur 5. Klimafaktorer som påvirker barriereeffekt ved induisert grunnvannsdannelse (etter Sprenger et al. 2011).

Økt vanntemperatur vil gi høyere inaktiveringsrater av mikroorganismer, noe som reduserer faren for vannbåren smitte. Samtidig viser klimaframskrivingene at økt temperatur trolig også vil øke vekstsesongen og hastigheten på biogeokjemiske prosesser. Lengre vekstsesong kan gi økt humusinnhold i vannkildene, som igjen kan påvirke den mikrobielle barriereeffekten negativt ved at humus i infiltrerende vann utkonkurrerer viruspartikler og andre smittestoffer i sorpsjonen til løsmassekorn, og derved opptar tilgjengelige adsorpsjonssteder på løsmassene. Den positive effekten med økt inaktiveringsrate kan dermed bli veid opp med redusert adsorpsjon. I tillegg vil økt hastighet på biogeokjemiske prosesser kombinert med høyere humusinnhold i vannkildene gi økt mikrobiell nedbrytning av humus, som i sin tur kan medføre reduserende forhold i akviferen og dermed økt konsentrasjon av løst jern (og mangan) i grunnvannet. Det er derfor svært viktig å ha fokus på riktig brønnplassering også i fremtiden, både for å unngå utfelling av jern i brønnfilteret og for å sikre tilstrekkelig mikrobiell beskyttelse.

De fleste innsjøer og elver i Norge er dekket av is i vinterhalvåret, og nedbør akkumuleres som snø (Knutsson 2008). Snødekke og tele gir en intensiv periode med grunnvannsnydannelse under og etter snøsmelting på våren. Dersom temperaturen øker vil mer av nedbøren i fremtiden falle som regn, slik at grunnvannsdannelsen blir mer jevnt fordelt over året i store deler av landet. I tillegg vil mer av nedbøren som kommer i vinterhalvåret infiltrere direkte i grunnen på grunn av økt grad av telefravær som en følge av økte temperaturer i vinterhalvåret. Mer nedbør vil generelt gi høyere vannstand og dermed økt uttakspotensiale ved grunnvannsforsyning.

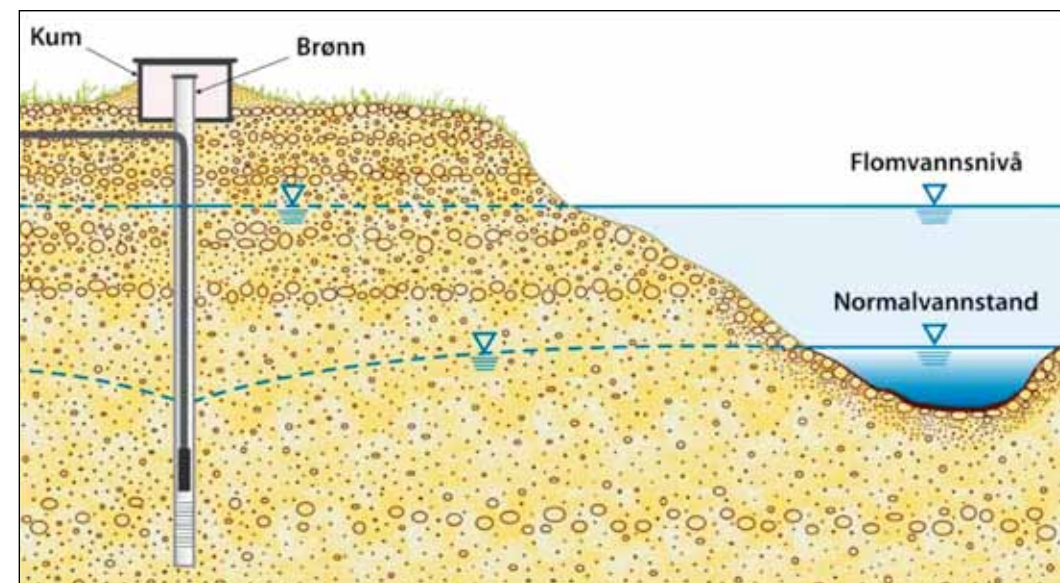
Ulempen med høyere vannstand er at mektigheten på den beskyttende umettede sonen (sonen der porene mellom sand- og gruskornene delvis er fylt med luft og delvis med vann) over grunnvannsspeilet reduseres. Den mikrobielle barriereeffekten i umettet sone er generelt mer intensiv enn i den underliggende grunnvannssonen (vannmettet sone) på grunn av tilstedeværelse av luft, stedege mikroorganismer og

mindre vanngjennomstrømming. Det er derfor nødvendig med en lengre oppholdstid per meter for vann som strømmer i mettet sone (som ved induert infiltrasjon) enn for vann i umettet sone (Sundén et al. 2010). Dersom mektigheten på umettet sone reduseres, vil dette redusere graden av mikrobiell adsorpsjon, predasjon og inaktivering.

Høyere vannstand i elver og innsjøer kan føre til at oppholdstiden mellom vassdraget og brønnområdet reduseres, på grunn av at vannet transporteres gjennom grovere lag høyere opp i elveleiet. Økt vannføring i vassdrag kan videre føre til at det rensende biolaget i elvebunnen skures bort, figur 6. I tillegg vil flere dager med store og intensive nedbørsmengder gi en økning i frekvensen av regnflommer (Hanssen-Bauer et al. 2009), som kan føre til oversvømmelse av både brønner og vannbehandlingsanlegg. Faren for mikrobiell forurensning av grunnvannet vil dermed øke.

Det er imidlertid viktig å huske på at klimaendringene vil slå ulikt til i de forskjellige landsdelene og mellom årstidene. Eksempelvis forventes økningen i temperatur å bli størst om vinteren og minst om sommeren; størst i Nord-Norge og minst på Vestlandet. Tilsvarende gjelder for nedbøren; det er beregnet større nedbørsøkning høst, vinter og vår enn sommerstid i landet som helhet, og mindre økning i nedbør for Sør- og Østlandet enn i øvrige deler av landet (Hanssen-Bauer et al. 2009). På Sør- og Østlandet kan redusert sommernedbør føre til tørkeperioder og lavere grunnvannsstand. Lavere grunnvannsstand vil stort sett være positivt med hensyn til den mikrobielle barriereeffekten, men negativt med hensyn til uttakskapasiteten. Lavere grunnvannsstand kombinert med høyere temperaturer og økt hastighet på biogeokjemiske prosesser kan også resultere i økt ioneinnhold i grunnvannet. I svovelrike bergarter kan slike episoder gi en markert forurensning av grunnvannet.

I sum vil et varmere, villere og våtere klima sannsynligvis resultere i redusert mikrobiell barriereeffekt ved grunnvannsuttag fra løsmasser, samtidig som at faren for tilførsel av fekal forurensning både fra tilstøtende vassdrag og fra «landsiden» øker på grunn av økt avrenning og



Figur 6. Infiltrasjonsflaten ved normalvannstand er ofte gjenslammet og har god rensende effekt på overflatevannet som infiltreres inn i grunnvannsmagasinet. Flom og økt vannføring kan føre til at slamlaget skrapes bort, eller at vann infiltrerer gjennom lag høyere opp langs elvebredden (kanaldrenering) der slamlaget ikke er etablert. Høyere vannstand vil i tillegg redusere mektigheten på umettet sone over grunnvannsspeilet. Dette fører til økt infiltrasjonshastighet og redusert renseseffekt (Gaut 2011).

økt fare for lekkasjer og overløp fra septiktanker og ledningsnett. Grunnvannsforsyninger uten permanent desinfeksjon og med kort oppholdstid mellom vassdrag og brønn har allerede i dag liten sikkerhetsmargin mot vannbåren smitte og er spesielt sårbare. I fremtiden vil sårbarheten ved disse anleggene trolig øke. Selv om den naturlige renseseffekten per i dag tilfredsstillende kravet til 1 hygienisk barriere, er det ikke sikkert at denne renseseffekten er tilstrekkelig til å hindre mikrobielt gjennombrudd til brønnene i fremtiden dersom den mikrobielle råvannskonsentrasjonen i overflatevannkilden øker. Anlegg som i dag regnes som sikre kan også bli mer sårbare i fremtiden på grunn av reduserte oppholdstider og varierende vannstand.

### Mulige "klimatiltak" ved grunnvannsforsyning fra løsmasser

Flere tiltak kan iverksettes i grunnvannsforsyningen for å redusere de negative effektene av forventede klimaendringer med hensyn til vann-

kvalitet og uttakskapasitet. Enkelte tiltak kan være nødvendige selv uten klimaendringer, men behovet forsterkes på grunn av klimaendringene (Svenskt Vatten 2007). Av tiltak myntet på å ivareta den hygieniske sikkerheten fremheves særlig:

- 1. Revisjon av klausuleringssoner og arealrestriksjoner, eventuelt å etablere ny dersom klausulering ikke eksisterer**  
Mange meldepliktige og mindre vannforsyninger mangler i dag beskyttelsesområder, og mange av de som har beskyttelsesområder har soner som ble avgrenset i forbindelse med etableringen av vannverket. Sonene er dermed ikke nødvendigvis oppdatert i forhold til hverken nytt regelverk eller med hensyn til klimatiske og/eller antropogene endringer i nedslagsfeltet.
- 2. Overvåke tilstøtende vassdrag (mengde og kvalitet) i tillegg til brønn**  
Ulike vanntyper påvirker hverandre der disse møtes. For å kjenne hele vannfor-

syningsystemet bør vannverk med naturlig eller induert grunnvannsdannelse i fremtiden øke fokuset på overvåking også av infiltrerende overflatevann, i tillegg til den brønnvannsovervåking som utføres i dag. Dersom det ikke er utført vannkvalitetsmålinger av infiltrerende overflatevann kjenner man i praksis ikke nødvendig barrierehøyde ved disse forsyningene.

### 3. Forbedre vannkvaliteten i vannkildene (i henhold til EUs vanddirektiv)

Klimaendringene forventes å gi økt overflateavrenning og økt frekvens av lekkasjer fra septiktanker og ledningsnett, og dermed økt fare for at vannkvaliteten i vannkildene forverres. Det bør derfor rettes fokus mot å intensivere tiltak som forhindrer tilførselen av antropogen forurensning til naturmiljøet, slik at den hygieniske sikkerheten i vannforsyningen ivaretas. De største hygieniske truslene er trolig knyttet til avrenning fra dyrka mark og beiteområder, utslipp av kloakk og sigevann fra avfallsdeponier.

### 4. Mer vannbehandling, inkl. permanent desinfeksjon

Gjeldende drikkevannsforskrift stiller krav om at alle norske vannforsyningssystem skal ha minst to uavhengige hygieniske barrierer, hvorav minst én barriere skal eliminere smittestoffer slik at disse ikke utgjør noen helsefare (SHD 2001). I forskriften fremgår at Mattilsynet kan gi dispensasjon fra kravet om desinfeksjon eller annen vannbehandling for grunnvannsanlegg med «god beskyttelse av vannkilden og hygienisk betryggende grunnforhold» (SHD 2001). Det finnes imidlertid ingen spesifikke og kvantitative krav i den norske drikkevannsforskriften om kravet til beskyttelse eller hvor effektive de mikrobiologiske barrierene skal være. I stedet er det oppgitt i veilederen at dersom summen av beskyttelsen og de hygieniske forholdene i grunnen er tilstrekkelige, kan grunnvannsutttaket i seg selv sidestilles med annen vannbehandling som fjerner, uskadeliggjør eller dreper smittestoffer (i praksis en sidestillelse med 3 log

reduksjon for virus og bakterier, og 2 log reduksjon for parasitter). Veiledningen påpeker at oppholdstiden ved grunnvannsforsyning bør utgjøre 60 døgn gjennom umettet og mette sone. Ved induert grunnvannsdannelse finnes imidlertid ingen umettet sone, og oppholdstiden mot vassdraget er ofte mindre enn 60 døgn på grunn av en kombinasjon av praktiske forhold ved hydrogeologiske forundersøkelser og avsetningenes begrensede utbredelse. Likevel er flere slike anlegg etablert uten desinfeksjon, ettersom det er vist at brønnvannet er fritt for fekale indikatorbakterier. Slike anlegg har liten sikkerhetsmargin mot vannbåren smitte allerede i dag, og vil være spesielt sårbare i fremtiden. Etablering av UV-behandling er et særlig aktuelt tiltak for økt beskyttelse mot mikroorganismer i drikkevannet ved slike anlegg.

### 5. Flytte anlegg/brønner til høyere liggende områder og/eller optimalisere sikringen av brønntopper for å unngå oversvømmelse og direkte innlekking i brønnen

#### Forskningsbehov

Selv om grunnvannsutttak med tilstrømning av overflatevann er en metode som har vært benyttet i Norge i over 60 år, finnes kunnskapshull både fordi fokuset har vært knyttet til kapasitetsøkning men også fordi det i løpet av denne tiden har skjedd en endring i betingelsene relatert til drikkevannsprroduksjon ved induert grunnvannsdannelse. Basert på vår kunnskap og erfaring foreslås følgende tema for videre forskning på grunnvannsutttak fra løsmasser under norske forhold:

- Mange norske tettsteder og byer ligger i elvedaler med mektige avsetninger i nærheten. Kan induert infiltrasjon av overflatevann i slike avsetninger øke den mikrobielle sikkerheten og den biologiske stabiliteten ved små og mellomstore vannforsyninger i Norge som i dag er basert på direkte overflatevannforsyning? Hvor stor reduksjon i mikrobiell risiko kan oppnås?

- Kan kunstig infiltrasjon øke mikrobiell sikkerhet og biostabilitet i norske vannforsyningssystem som i dag er basert på direkte behandling av overflatevann?
- Hvilke kostnadsbesparelser kan oppnås ved å benytte induert eller kunstig infiltrasjon som et ledd i vannbehandlingen sammenlignet med konvensjonell vannbehandling?
- Vil oppnådd renseseffekt ved induert og kunstig infiltrasjon være den samme selv om kvaliteten på overflatevannkilden forverres?
- Kan vi forvente en økning i kostnader knyttet til vannbehandling ved grunnvannsutttak fra løsmasser i fremtiden – på grunn av økt mikrobiell risiko i vannkilder generelt og økt behov for fjerning av kjemiske stoffer? Hvor stor blir i så fall de økte kostnadene?
- Hvordan påvirkes akviferhydraulikken og dermed vannkvaliteten for produksjonsbrønner som er etablert i tilknytning til regulerte vassdrag?
- Hvordan utvikles redoks-forholdene i en akvifer med induert eller kunstig infiltrasjon? Hva er optimal brønnplassering både for å unngå jernutfelling og samtidig opprettholde tilstrekkelig uttakskapasitet og mikrobiell vannkvalitet? Vil brønnplassering i eller svært nær vassdraget gi barriereeffekt av betydning?
- Kan brønnutforming bidra til å redusere utfellingen av jern på brønntfilter?

#### Konklusjon

Denne artikkelen oppsummerer noen av konsekvensene et forventet varmere, våtere og villere klima vil ha for grunnvannsforsyning fra løsmasser i Norge. Grunnvannsforsyning fra løsmassanlegg forsyner i dag 9 % av befolkningen som tilknyttet meldepliktige vannverk i Norge, og forventes å få økt betydning for vannforsyningen i fremtiden. I motsetning til vårt naboland Sverige, mangler fremdeles kostnadsberegninger og kvantitative estimeringer av klimakonsekvensene når det gjelder grunnvannsforsyning generelt i Norge.

Selv om et varmere, villere og våtere klima trolig vil redusere den generelle mikrobielle

barriereeffekten ved grunnvannsutttak fra løsmasser med induert infiltrasjon, vil metoden likevel gi en mer stabil og forutsigbar hygienisk vannkvalitet som er enklere og billigere å behandle sammenlignet med direkte uttak av overflatevann også i fremtiden forutsatt at grunnvannets konsentrasjon av jern og mangan ikke medfører praktiske eller estetiske problemer.

For å ivareta den mikrobielle sikkerheten ved grunnvannsforsyning også i fremtiden er det behov for økt fokus på undersøkelse og overvåking av vannkvalitet og mengde av infiltrerende overflatevannkilde i tillegg til brønnvann, sammenlignet med dagens praksis. Behovet for permanent desinfeksjon vil også øke. I tillegg vil det ved mange anlegg være behov for å oppdatere klausuleringssonene, optimalisere sikring av brønntopper og brønnhus, samt flytte brønner/anlegg til høyere liggende områder.

Ettersom den naturlige barriereeffekten kan variere mellom ulike vannverk, og på grunn av variasjoner i de spesifikke egenskaper hos de ulike smittestoffene, kan det i fremtiden bli behov for mer overvåking generelt samt økt behov for bruk av verktøy for kvantitativ vurdering av mikrobiell risiko (for eksempel Quantitative Microbial Risk Assessment, QMRA, og Mikrobiell barriereanalyse, MBA) i vannforsyningssystemene.

#### Takk

Arbeidet som er presentert i denne artikkelen er en del av et pågående PhD-studium om hygieniske barrierer ved grunnvannsforsyning i løsmasser ved NTNU og Asplan Viak AS, og del-finansiert av Norsk Vann. En stor takk rettes til Sven Jonasson (Geo Logic i Göteborg AB), Bernt Olav Hilmo (Asplan Viak AS) og Bjørge Brattli (Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU), og til to anonyme fagfeller for kommentarer til manuskriptet.

#### Referanser

Banks, D., Midtgård, A. K., Morland, G., Reimann, C., Strand, T., Bjorvatn, K., Siewers, U. (1998): Is pure groundwater safe to drink?: natural "contamination" of groundwater in Norway. *Geology Today*. 14(3), 104-113.

Bomo, A. M., Tryland, I. (2011): Effekt av klimaendringer på vannkvalitet og drikkevannsbehandling. Tilpasning til ekstremvær under klimaendringer i norske kommuner, s 34-43. CIENS-rapport 4-2011, ISBN: 978-82-92935-09-5

Bradford, S. A., Bettahar, M., Simunek, J., van Genuchten, M. T. (2004): Straining and attachment of colloids in physically heterogeneous porous media. *Vadose Zone J.* 3, 384-394.

Dash, R., Mehrotra, I., Kumar, R., Grischek, T. (2008): Lake bank filtration at Nainital, India: water-quality evaluation. *Hydrogeol. Journ.* 16, 1089-1099.

Fonahn, W. (2014): Vil klimaendringene øke sannsynligheten for vannbåren sykdom? Scenarier for fremtiden. *Vann*, 01-2014, 73-81.

Gaut, S. (2008): Verktøy for vurdering av vannkilden som hygienisk barriere. *Grunnvann i fjell*. NGU-rapport 2008.060. ISSN 0800-3416.

Gaut, S. (2011): Beskyttelse av grunnvannsanlegg – en veileder. *Norges geologiske undersøkelser*, 45 s. ISBN 978-82-7385-145-1.

Grunnvann i Norge (2006): [http://www.grunnvanninorge.no/grunnvann\\_bruk\\_av.php](http://www.grunnvanninorge.no/grunnvann_bruk_av.php)

Gupta, V., Johnson, W., Shafieian, P., Ryu, H., Alum, A., Abbaszadegab, M., Hubbs, S. A., Racuh-Williams, R. (2009): Riverbank Filtration: Comparison of Pilot Scale Transport with Theory. *Environ. Sci. Technol.*, 2009, 43 (3), pp 669–676

Hannapel, S., Scheibler, F., Huber, A., Sprenger, C., (2014): M11.1 Characterization of European managed aquifer recharge (MAR) sites – Analysis. 308339 Project Demeau, WP1, delivery M11.1. [www.demeau-fp7.eu](http://www.demeau-fp7.eu).

Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E.J., Roald, L.A., Børsheim, K.Y., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., Sundby, S., Vasskog, K., Ådlandsvik, B. (2009): Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilplassing, Norsk klimasenter.

Hem, L., Eikebrokk, B., Røstum, J., Weideborg, M., Østerhus, S. W. (2008): Vannkilden som hygienisk barriere. *Norsk Vann-rapport B10*.

Hijnen, W., Suylen, G., Bahlman, J., Brouwer-Hanzens, A., Medema, G. (2010): GAC adsorption filters as barriers for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water treatment. *Wat. Research* 44, 1224-1234.

Hiscock, K., Grischek, T. (2002): Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *Jour. Hydrol.* 266, 139-144.  
Jin, Y., Flury, M. (2002): Fate and Transport of Viruses in Porous Media, *Adv. Agron.*, 77, 39-102.

John, D., Rose, J. (2005): Review of factors affecting microbial survival in groundwater. *Env. Sci. Technol.* 39, 7345-7356.

Knorr, M. (1937): Die Schutzzonefrage in der Trinkwasserhygiene. *Das Gas- Wasserfach*, 80, 350-355.

Knutsson, G. (2008): Hydrogeology in the Nordic countries. *Episodes*, Vol. 31, No. 1. 148-154.

Kvitsand, H., M. L., Østerhus, S. W., Fiksdal, L., Hilmo, B. O., Brattli, B. (in prep): Attenuation of NOM and microorganisms during short-time bank filtration in heterogeneous sand and gravel aquifers in Mid-Norway.

Kvitsand, H. M. L., Fiksdal, L. (2010): Waterborne disease in Norway: emphasizing outbreaks in groundwater systems. *Wat. Sci. Techn.* 61,3, 563-571.

Mattilsynet (2011): Veiledning til drikkevannsforskriften. *Versjon 3*.

Miljøverndepartementet (MD) (2013): Stortingsmelding 33 – Klimatilpasning i Norge.

Morland, G. (1996): Bruk av grunnvann i Norge. *NGU-rapport 96.092*. ISSN 0800-3416.

Myrstad, L., Nordheim, C. F., Einan, B. (2014): Vannrapport 121. Rapport fra vannverksregisteret. Drikkevannsstatus (data 2009 og 2010). ISSN 1503-2167.

Nasjonalt Folkehelseinstitutt (2004): Vannforsyningens ABC. Kapittel C: Vannkilder og nedbørfelt. (<http://www.fhi.no/tema/drikkevann/vannforsyningens-abc>)

Nasjonalt Folkehelseinstitutt (2008): Vannforsyningens ABC. Kapittel D: Vannbehandling. (<http://www.fhi.no/tema/drikkevann/vannforsyningens-abc>)

Norges geologiske Undersøkelse (NGU) (1992): *Grunnvann i Norge (GiN)*. Sluttrapport.

Nygård, K., Gondrosen, B., Lund, V. (2003): Vannbårne sykdomsutbrudd forårsaket av drikkevann i Norge. *Tidsskr. No. Lægeforen.* 23(123), 3410–3413.

Pedley, S., Yates, M., Schijven, West, J., Howard, G., Barrett, M. (2006): Pathogens: Health relevance, transport and attenuation. *Protecting groundwater for health*, 50 – 80. ISBN 1843390795.

Ray, C. (2002): Effect of biogeochemical, hydrogeological, and well construction factors on riverbank filtrate quality. *Riverbank filtration: Understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal*, 1 – 16. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands. ISBN 1-4020-0955-0.

Sakthivadivel, R. (1966): Theory and mechanism of filtra-

tion of non-colloidal fines through a porous medium. *University of California, Berkley, US*, p. 110.

Sakthivadivel, R. (1969): Clogging of a granular porous medium by sediment. *University of California, Berkley, US*, p. 110.

Schijven, J. F., Husman, A. M. R. (2005): Effect of climate changes on waterborne disease in The Netherlands. *Wat. Sci. Techn.* 51, 79-87.

Schijven, J., Hassanizadeh, S. (2000): Removal of viruses by soil passage: overview of modeling, processes and parameters. *Crit. Rev. Environ. Sci. Tech.* 31, 49-125.

Smeets, P., Medema, G., van Dijk, J. (2009): The Dutch secret: how to provide safe drinking water without chlorine in the Netherlands. *Drink. Water Eng. Sci.*, 2, 1-14.

Sosial- og helsedepartementet (SHD) (2001): Forskrift om vannforsyning og drikkevann (Drikkevannsforskriften).

Sprenger, C., Lorenzen, G., Hülshoff, I., Grützmaier, G., Ronghang, M., Pekdeger, A. (2011): Vulnerability of bank filtration systems to climate change. *Sci. Tot. Environ.* 409, 655-663.

Sundén, G., Maxe, L., Dahné, J. (2010): Grundvattennivåer och vattenförsörjning vid ett förändrat klimat. *SGU-rapport 2010:12*.

Svenskt Vatten (2007): Dricksvattenförsörjning i förändrat klimat. Underlagsrapport till Klimat- och sårbarhetsutredningen. *Meddelande M135*. ISSN 1651-6893.

Tryland, I., Robertson, L., Blankenberg, A.-G., Lindholm, M., Röhrlack, T., Lilthved, H. (2011): Impact of rainfall on microbial contamination of surface water. *Int. Jour. Climate* (3), 4, 361-373.

Tufenkji, N., Ryan, J., Elimelech, M. (2002): The promise of bank filtration. *Environ. Sci. Technol.* 423-428.

Van der Wielen, P., Senden, W., Medema, G. (2008): Removal of bacteriophages MS2 and φX174 in a sandy anoxic aquifer. *Environ. Sci. Technol.* 42, 4589-4594.

Weiss, J., Bouwer, E., Aboytes, R., LeChevallier, M., O'Melia, C., Le, B., Schwab, K. (2005): Riverbank filtration for control of microorganisms: Results from field monitoring. *Wat. Res.* 39, 1990-2001.

Xu, S., Gao, B., Saiers, J. (2006): Straining of colloidal particles in saturated porous media. *Water Resour. Res.* 43, W1216.

Ødegaard, H., Østerhus, S. W., Melin, E., (2009): Veiledning til bestemmelse av god desinfeksjonspraksis: sluttrapport fra prosjektet Optimal desinfeksjonspraksis. *Norsk Vann Rapport 170/2009*. ISBN: 9788241403071