

Pumpetester av grunnvannsbrønner: Erfaringer med kapasitetstester av produksjonsbrønner

Av Sondre Gjengedal, Mari H. Riise og Rolf E. Forbord

Sondre Gjengedal (Ph.D) er hydrogeolog ved Norges Geotekniske Institutt.

Mari H. Riise (M.Sc) er hydrogeolog hos Asplan Viak AS.

Rolf E. Forbord (B.Sc) er hydrogeolog hos Asplan Viak AS.

Summary

Pumping tests in groundwater wells: experience with production well testing. There is often a requirement to document well performances and wells' tolerability for groundwater extraction. Step drawdown tests describes the well performance as a function of the pumping rate and provides the required information in the manner of individual well equations. This paper presents three such step tests acquired from different wells in Norwegian aquifers, respectively in Melhus, Lillemoen, and Heimernesan. These tests display a variety of hydraulic responses, even though the wells are installed in similar soil conditions and equipped with comparable gear. This variation demonstrates why it is important to conduct and document the well tests in an orderly and systematic manner. The tests show that all three wells operate within the conventional design criterion of 3.0 cm/s critical screen flow velocity, but only the Heimernesan well displays a linear well performance. This implies that the design criterion of 3.0 cm/s does not ensure a linear well performance.

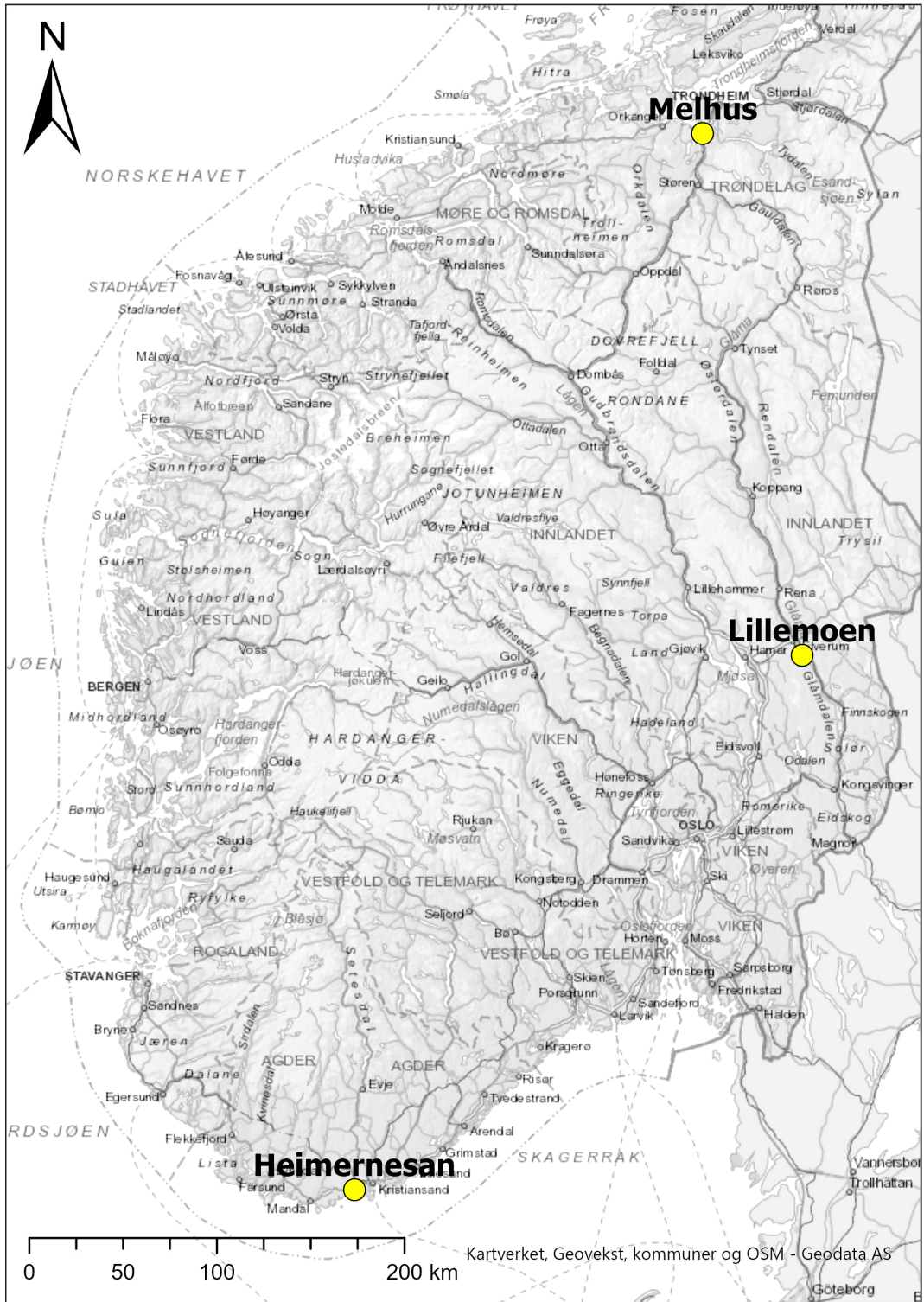
Sammendrag

Det er ofte nødvendig å dokumentere brønners produksjonskapasitet og tåleevne for grunnvannsuttak. Trinntester er en type pumpetester

som gir et datagrunnlag som beskriver brønnens ytelse som funksjon av pumperaten, gjerne i form av brønnligninger. I denne artikkelen presenteres trinntester for tre filtersatte rørbrønner i forskjellige grunnvannsmagasiner i Norge, ved henholdsvis Melhus, Lillemoen og Heimernesan. Til tross for at brønnene er plasserte i relativt like løsmassetypene og med forholdsvis lik brønnutrustning, viser testene svært ulike testresponser, med både lineære og ulineære senkningsforløp, samt én tidsavhengig og to tidsuavhengige senkningsresponser. Denne variasjonen viser hvorfor det er viktig at brønntester gjennomføres og dokumenteres på en oversiktlig og systematisk måte. Testene viser at alle tre brønnene opererer innenfor designkriteriet med 3,0 cm/s for kritisk filterhastighet, men det er kun Heimernesan-brønnen som opererer med en lineær brønnnyttelse. Dette tyder på at dimensjoneringskriteriet på 3,0 cm/s ikke nødvendigvis er tilstrekkelig for å sikre en lineær brønnnyttelse.

Innledning

Grunnvann er en viktig og lokal ressurs i Norge. Det nyttiggjøres som kilde til drikkevann, både som private drikkevannsbrønner og for større anlegg i regi av kommunale vannverk, eller som



Figur 1. Testområder for pumpetestens.

vannkilde til irrigasjonsanlegg for landbruket. Grunnvann er også svært effektivt som energikilde i f.eks. grunnvannsbaserte varmepumpesystemer, eller som kjølevann til prosessindustri. Borede brønner i berg er vanlige for uttak av mindre mengder grunnvann, mens filtersatte rørbrønner i sand- og grusmasser er den vanligste brønntypen for større grunnvannsanlegg her til lands.

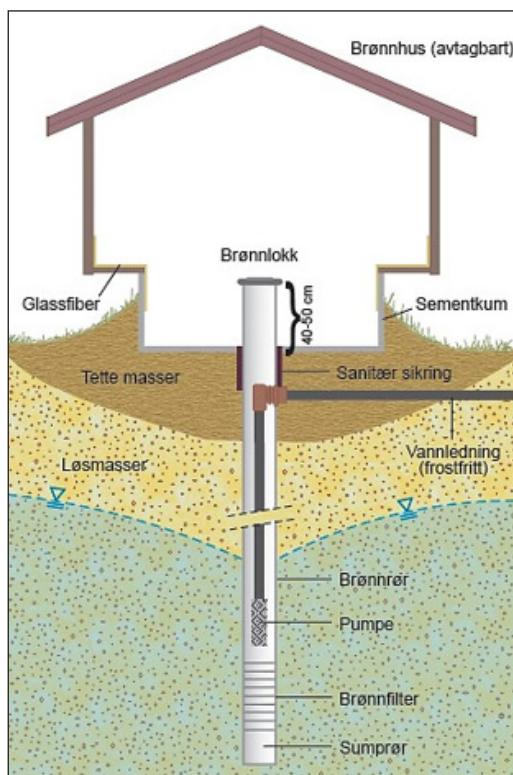
For å sikre optimal drift og vedlikehold av brønner, samt bærekraftig utnyttelse av grunnvannet, vil det ofte være nødvendig å dokumentere en brønns produksjonskapasitet og tåleevne for grunnvannsuttak. I slike tilfeller gjennomføres pumpe- og kapasitetstester av brønnene. Pumpe- og kapasitetstester gjennomføres på ulike måter avhengig av hva som skal dokumenteres, og det kan være stor variasjon i testmetodikk og -omfang. For kommunale vannverk vil det ofte være behov for større omfang av tester enn for private grunnvannsanlegg. For mindre prosjekter er det heller ikke uvanlig at det ikke finnes observasjonsbrønner tilgjengelig. I slike tilfeller gjennomføres derfor både pumpe- og målingen i samme brønn. I de fleste tilfeller er det hensiktsmessig å gjennomføre en trinntest av produksjonsbrønner for å dokumentere brønnens hydrauliske respons ved ulike pumpe- og målinger i samme brønn. Trinntester er også spesielt nyttig for systemovervåking i større grunnvannsanlegg og for å kunne kartlegge problemområder i anlegget over tid (Banks et al., 1989; Kruseman & De Ridder, 1994; Gjengedal et al., 2021).

I denne artikkelen presenteres trinntester for tre filtersatte rørbrønner i forskjellige grunnvannsmagasin i Norge bestående av sand og grus, ved henholdsvis Melhus, Lillemoen og Heimernesan (Figur 1). Hensikten er å vise hvordan slike trinntester gjennomføres i praksis, samt å dokumentere ulike brønnrespons og diskutere hva som kan være årsaken til dette. Datasettene sammenstiller geologiske data, testmetodikk og brønnutstyr som benyttes i testene, og kan være nyttig som referanse i andre tilsvarende prosjekter.

Generell bakgrunn og teori

En produksjonsbrønn i løsmasser består av et brønnrør med et brønnfilter (Figur 2). Brønnfilteret er perforert og har spesialtilpassede slisseåpninger som tillater grunnvann å strømme inn i brønnen, mens de omkringliggende sedimentene blir tilbakeholdt på utsiden av brønnen. Brønnfilterets plassering i løsmasseprofil, filtertype og dimensjoner bestemmes med grunnlag i forundersøkelser for å oppnå best mulig hydrauliske egenskaper for produksjonsbrønnen. Brønnfilteret plasseres tilstrekkelig dypt under grunnvannspeilet i et jordprofil hvor løsmassetypen er dominert av sand- og grusfraksjoner.

Etter hvert som vann blir pumpet ut og fjernet fra brønnrøret og grunnvannsmagasinet, induseres en innadrettet grunnvannsstrømning mot brønnen. Dette resulterer i en trykkreduksjon



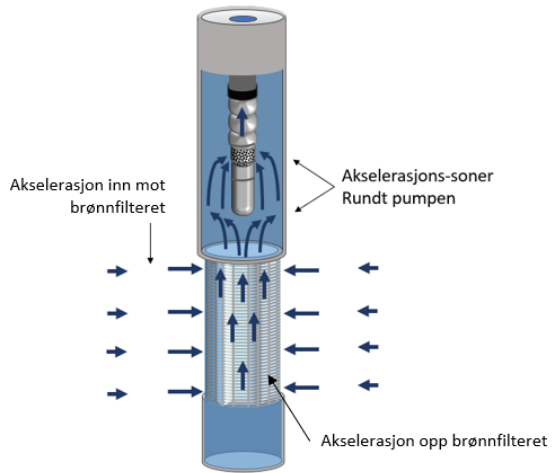
Figur 2. Konseptuell skisse av en boret rørbrønn i løsmasser med hovedkomponenter fremhevet i bildeteksten (NGU, 2016). Brønnhuset er i mange tilfeller erstattet med en sementkum med lakk.

lokalt i akviferen som gradvis brer seg radielt ut fra brønnfilterets plassering i akviferen. Dette forårsaker en lokal grunnvannssenkning rundt brønnen, en såkalt senkningstrakt (Figur 2). Senkningstraktens størrelse og utbredelse avhenger av uttaksmengden (Q - $l \cdot s^{-1}$), pumpetiden, vannets fluidmekaniske egenskaper (dynamisk viskositet og tetthet), akviferens størrelse og mektighet, samt akviferens permeabilitet og beta-koeffisient (Kruseman & De Ridder, 1994). Summen av alle trykktapene, både i akviferen og i brønnen, vil utgjøre den totale senkningen i brønnrøret (Δs - m). Trykktapet kan inneha komponenter som skyldes både viskøse krefter og akselerasjonskrefter i vannstrømningen. Det er vanlig å sammenstille bidragene fra de viskøse kreftene ($B \cdot Q$) og akselerasjonskreftene ($C \cdot Q^2$) i overordnet form for produksjonsbrønner, som vist i ligning (1) (Kruseman & De Ridder, 1994; Rorabaugh, 1953; Hantush, 1964; Bierschenk, 1963).

$$\Delta s = B \cdot Q + C \cdot Q^2 \quad (1)$$

Strømningshastigheten styrer hvilke krefter som dominerer. I akviferer vil ofte strømningshastigheten være liten, og da vil de viskøse strømningskreftene dominere, mens akselerasjonskreftene i andregradsleddet i ligning (1) kan ignoreres ($C \cdot Q^2 \approx 0$). Senkningen i brønnen er da proporsjonal med pumperaten Q , og brønnens spesifikke kapasitet er gitt av et lineært forholdstall (B). Dette er ikke alltid tilfellet for produksjonsbrønner, fordi grunnvannsstrømningen foregår radielt inn mot et punkt i akviferen. Den radielle strømningen gjør at gjennomstrømningsarealet for vannet avtar etter som vannet nærmer seg brønnens filter-satte del i grunnvannsmagasinet. Denne areal-innsnevringen fører til at vannhastigheten gradvis øker inn mot brønnen, dvs. hastigheten akselererer (Figur 3). Disse akselerasjonskreftene vil kunne gjøre at begge leddene i ligning (1) må benyttes for å beskrive senkningen i brønnrøret. Slike akselerasjonstap betegnes ofte som "filtertap", "brønntap" eller "turbulensstap", fordi de

typisk oppstår i umiddelbar nærhet til brønnen hvor vannet har størst hastighet. Generelt er akselerasjonstap uønsket i brønner, fordi det tradisjonelt er forbundet med økt risiko for gjentetting og utvasking av sedimenter ved å drifte brønner ved ulineære strømningsforhold (Van Beek, 2011). For å unngå slike senkningsbidrag benyttes ofte en øvre tillatt strømningshastighet gjennom brønnfilteret som dimensjoneringskriterium, typisk satt til 3,0 cm/s (Driscoll, 1986; Fetter, 2001).



Figur 3. Prinsipiell skisse over strømningsforholdene ved en pumpebrønn. Vannhastigheten akselererer når gjennomstrømningsarealet minker. Pumpens utforming gjør at vannets hastighet akselererer forbi motoren.

Også andre deler av brønnen kan forårsake akselerasjonskrefter i strømningen. I særskilte tilfeller gjelder dette pumpen selv. Senkepumper er konstruert slik at vanninntaket er plassert over motoren. Når pumpen er montert i en brønn må vannet strømme forbi en innsnevret kanal, mellom brønnrøret og motoren (Figur 3). Denne innsnevringen fører til at det oppstår et lokalt akselerasjonsfelt i brønnen i forkant av denne innsnevringen. I tillegg akselererer vannet på vei inn i pumpehuset. Det er derfor viktig at pumpens størrelse dimensjoneres i samsvar med brønnens størrelse for å unngå uønskede tilleggstap og vannstandssenkning.

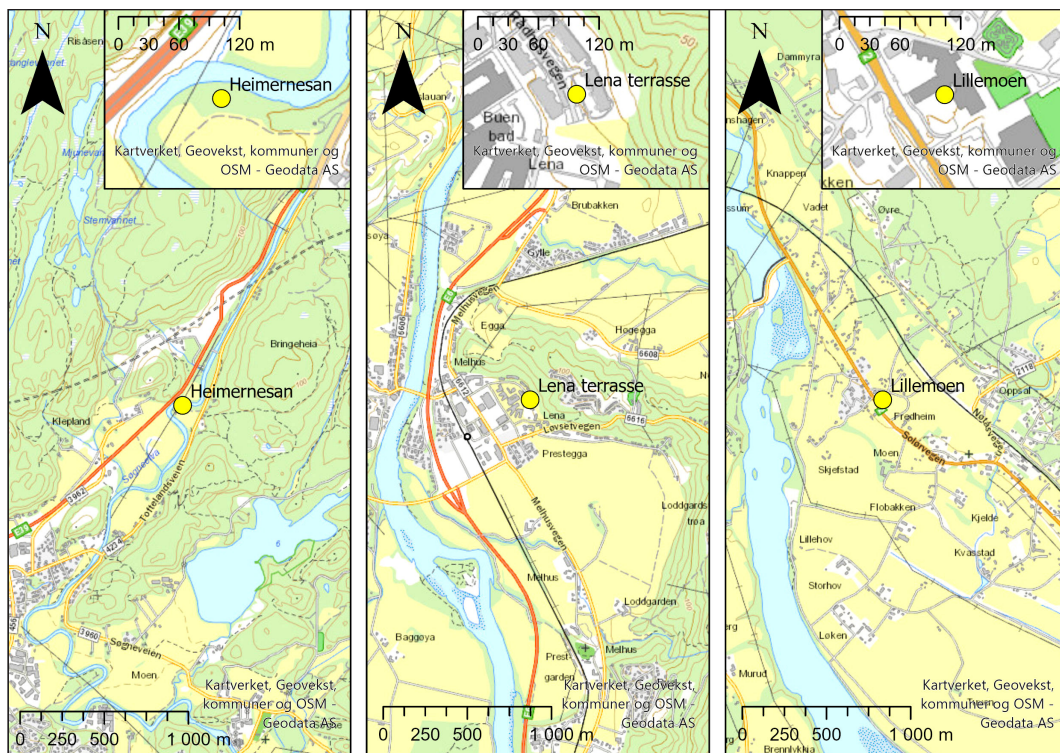
Metodebeskrivelse og brønnbeskrivelse

Trinntest-metoden bygger på at brønnen pumper med en serie suksessivt økende pumperater. Hver rate (trinn) holdes konstant for en periode, hvorpå senkningsforløpet i brønnen registreres regelmessig og nøy. Testen krever minimum tre ulike pumperater, som bør fordeles jevnt mellom pumpens nedre og øvre kapasitetsområde. Tre trinn er nødvendige, fordi ligning (1) innehar to ukjente parametere (B og C), som enkelt lar seg identifisere med tre eller flere separate målinger. Flere trinn kan benyttes, men i praksis er det vanlig å benytte tre trinn for å spare tid (Gjengedal et. al, 2021).

Varigheten på hvert trinn er typisk mellom 30-120 minutter (Kruseman & De Ridder, 1994), men kan reduseres hvis brønnen oppnår stabil senkning. I mange tilfeller vil det kreves lang tid for å oppnå stabil vannstand, og da bør det

benyttes en tidsreferert brønnkapasitet i analysen for å spare tid, som refererer analysen til en gitt pumperate og til en gitt tid etter oppstart av hvert trinn. Hvis det foregående senkningsforløp ikke er helt stabilisert, vil det fortsatt gjenstå tidsavhengige trykkresponser som vil påvirke senkningsforløpet til de etterfølgende trinnene. Det kan være utfordrende å håndtere dette i tolkningsarbeidet etter testen. For å kunne benytte disse dataene til å fastsette brønnnyttelse og hydrauliske parametere, er det avgjørende at hvert påfølgende pumpetrinn har lik varighet som det foregående (Kruseman & De Ridder, 1994).

Det kan legges inn pauser mellom trinnene (stigningstester), eller trinnene kan følge direkte fra foregående trinn. Tre ulike varianter av metoden blir her beskrevet for tester som er gjennomført i ulike produksjonsbrønner, i Heimernesan-brønnen, i Melhus-brønnen og i Lillemoen-brønnen (Figur 4).



Figur 4. Oversiktskart over plasseringen til Heimernesan-brønnen (t.v.), Melhus-brønnen (midten) og Lillemoen-brønnen (t.h.). Brønnene er registrerte i karttjenesten "Granada" og er gitt et ID-nummer i databasen til Norges Geologiske Undersøkelser – NGU.

Heimernesan

Brønnen benyttes til vannforsyning og ligger ved Søgneelven, på en elveslette i Heimernesan i en smal dalgang nord for Tangvall i Kristiansand kommune ((Brønn-2) beskrevet i Forbord, 2016). Brønnen er totalt 28,25 meter dyp og står i en åpen akvifer bestående av elveavsetninger og glasifluviale sand- og grusmasser. Brønnfilteret er installert i nedre del i grusholdig sand ved 18,25 – 28,25 meter under terreng. Pumpetypen er ukjent, men det er kjent at pumpens motorbunn står 0,25 meter over øvre filterkant. Brønnspesifikasjoner er videre gitt i Tabell 1 og i Figur 5.

Den 22. januar 2015 ble denne brønnen testpumpet med trinntestmetoden for å fastsette brønnnytelse og hydrauliske parametere (Forbord, 2016). Grunnvannstanden før oppstart var ca. 1,0 meter under terrengnivået, eller 18,2 meter over pumpen. Det ble benyttet tre trinn av 60 minutter, hvorav pumperatene var 15,4 l/s – 29,6 l/s – 43,0 l/s for henholdsvis første til siste trinn. Det ble benyttet en mekanisk vannmåler og strupeventil for å justere pumperaten. Vannstanden i brønnen ble logget med målesnelle med lyd og lyslodd gjennom et varerør installert over brønnpumpen. Etter siste trinn ble pumpen slått av og stigningen av vannstanden registrert.

Melhus

Brønnen benyttes til energiformål og ligger nedenfor Melhusryggen i Melhus sentrum, tilknyttet Lena Terrasse varmesentral. Brønnen er boret i et område bestående av glasifluviale sand- og grusmasser som er overlagret av 15 meter marin leire. Grunnvannspeilet og akviferen ligger under leiren og kan betegnes åpen i denne delen av Melhus. Brønnen er totalt 36,4 meter dyp, hvor 6,0 meter med filter er installert i nedre del i sandig grus ved 29,4 – 35,4 meters dyp under terreng. Pumpen er en Grundfos SP-60-5N senkepumpe med MS6000 motor, hvor pumpens motorbunn står 1,0 meter over øvre filterkant. Brønnspesifikasjoner er videre gitt i Tabell 1 og i Figur 5.

Den 8. oktober 2019 ble denne brønnen rutinemessig testpumpet for å kontrollere at brønnens ytelse var opprettholdt (tidligere

beskrevet i detalj i Gjengedal et. al, 2021). Tidligere tester hadde vist at brønnen oppnådde stabil senkning innen noen få minutter, og at varigheten av hvert trinn kunne reduseres til 15 minutter. Testen ble startet som en del av den daglige driften av anlegget, uten at pumpen ble slått av før oppstart. Nullpunktkalibreringen ble gjort ved at pumpen ble slått av til slutt. Grunnvannstanden før teststart var ca. 20,7 meter under terrengnivået, eller 6,8 meter over pumpen. Det ble benyttet 19 trinn av 15 minutter, hvorav pumperatene var jevnt fordelt mellom 5,5 l/s – 15,8 l/s for henholdsvis laveste til høyeste rate. Det ble benyttet en inkrementell opptrapping og nedtrapping av trinnene før pumpen ble slått av, hvor en frekvensomformer justerte pumperaten mellom 60 – 100 % av motorfrekvensen (30 – 50 Hz). Pumperaten ble registrert av en Badger ModMAG M1000 vannmåler. Vannstanden i brønnen ble logget hvert 60 sekund ved hjelp av en Siemens Sitrans LH100 trykktransmitter montert i et varerør ca. 0,3 meter over pumpen.

Lillemoen

Brønnen benyttes til energiformål og ligger ved Lillemoen barneskole i Heradsbygda, sør i Elverum kommune. Brønnen er boret i en åpen akvifer bestående av fluviale sand- og grusmasser. Brønnen er totalt 24,0 meter dyp, hvor 6,5 meter med filter er installert i nedre del i sandig grus ved 18,5 – 24,0 meters dyp under terreng. Pumpen er en Franklin Electric VS-30/4 senkepumpe med E4 motor, hvor pumpens motorbunn står 0,2 meter over øvre filterkant. Brønnspesifikasjoner er videre gitt i Tabell 1 og i Figur 5.

Den 22. februar 2017 ble denne brønnen testpumpet med trinntestmetoden for å fastsette brønnnytelse og hydrauliske parametere. Grunnvannstanden før oppstart var ca. 13,84 meter under terrengnivået, eller ca. 4,0 meter over pumpen. Det ble benyttet tre trinn av 45 minutter, hvorav pumperatene var 2,63 l/s – 6,25 l/s – 10,30 l/s. Det ble benyttet en mekanisk vannmåler og en strupeventil for å justere pumperaten. Siste trinn fikk så fortsette å gå inntil vannstanden stabiliserte seg (over natten).

Tabell 1. Brønnsesifikasjoner for produksjonsbrønnene (Forbord, 2016; Gjengedal et al., 2021).

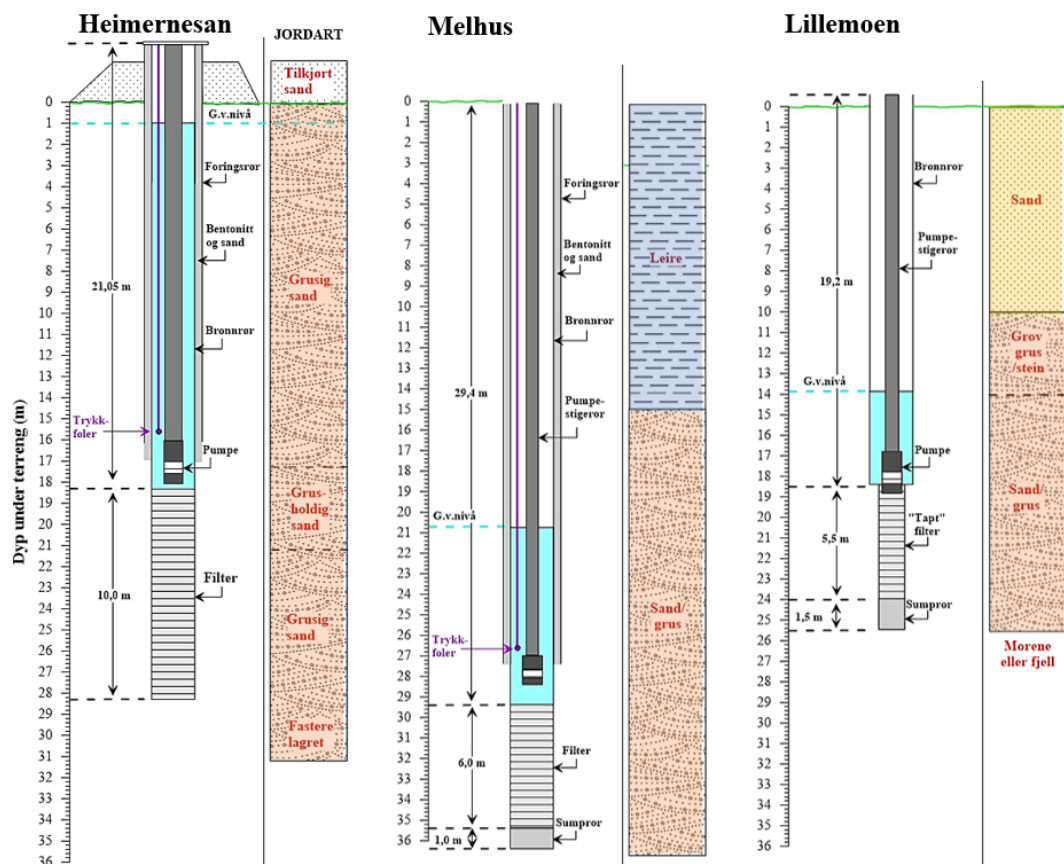
	Brønnerør: diameter OD/ID [mm]	Filterørør*: diameter OD/ID [mm]	Filterørør*: lengde [m]	Filterørør*: slisseåpning / perforering	Pumpemotor- størrelse / diameter	Arealforhold: a [-]
Heimernesan (ID-86189)	273/267	273/255	10,0	0,75 mm / 25 %	8" / 192 **	0,73
Melhus (ID-87103)	168/158	161/150	6,0	1,00 mm / 31 %	6" / 138	0,24
Lillemoen (ID-95774)	219/207	170/159	6,5	1,50 mm / 40 %	6" / 142	0,56

* alle brønnfilterne er "formasjonsfilter" av typen kontinuerlig slissefilter av rustfritt stål, dvs. ikke gruskastet.

** Antatt pumpestørrelse basert på pumpekapasitet brukt i testen.

Vannstanden i brønnen ble logget på to ulike måter parallelt. I bunnen av filteret ble vannsøylen registrert med Mini-Diver TD-50 hvert femte sekund. Samtidig ble dybde til vannspeilet fra brønntopp logget med målesnelle med lyd

og lyslodd og med synkronisert klokke. Tolv timer etter starten av siste pumpetrinn, ble Mini-Diver TD-50 loggeren flyttet opp til over filterkant for å sammenligne med de manuelle målingene.



Figur 5. Brønnlogg og systemskisse for a) Heimernesan-brønnen, b) Melhus-brønnen og c) Lillemoen-brønnen.

Senkningsdataene fra trinntestene er evaluerte i henhold til Hantush-Bierschenks metode (beskrevet i Kruseman & De Ridder, 1994). I Hantush-Bierschenks metode fastsettes brønnnyttelsen etter ligning (2), hvor senkningen ($S_{n,t}$ - m) i brønnen er en funksjon av både pumperaten ($Q_n - l \cdot s^{-1}$) ved et gitt trinn (n) og tiden (t) etter oppstart av dette trinnet. Hvis senkningen blir stabil, vil ligning (2) være uavhengig av tid og senkningsdataene (S_n) kan plottes direkte mot pumperaten (Q_n) i analysen. Konstantene B og C bestemmes deretter ved lineær regresjon i Excel.

$$s_{n,t} = B \cdot Q_n + C \cdot Q_n^2 \quad (2)$$

En viss andel av akselerasjonstapet som inngår i C vil kunne komme av brønnpumpen. Det er ikke vanlig å beregne disse tapene direkte. Et slikt pumpetap (C_p - m) kan derimot estimeres empirisk med bakgrunn i rørligningen gitt av ligning (3) hvor akselerasjonstapet bestemmes av tapskoeffisienten (K_L), tyngdeakselerasjonen ($g - m \cdot s^{-2}$) og vannets gjennomsnittshastighet forbi pumpens motor ($V - m \cdot s^{-1}$).

$$C_p = K_L \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3)$$

$$K_L = K_{ekspansjon} + K_{kontraksjon} = (1 - a)^2 + 0.5 \cdot (1 - a) \quad (4)$$

Tapskoeffisienten (K_L) beregnes etter ligning (4) som er eksperimentelt utledet for rørstrømning (Rennels & Hudson, 2012). Pumpens utforming forårsaker to tapsledd i strømmingen, ett kontraksjonstap foran motoren og ett ekspansjonstap etter motoren og mot vanninntaket. Disse tapene estimeres ut fra forholdstallet mellom strømningstverrsnittet til brønnrøret og den innsnevrede delen rundt motoren, i ligning (5).

$$a = \frac{Areal_{innsnevring}}{Areal_{brønnrør}} \quad (5)$$

Denne tilnærmingen vil antakelig underestimere de faktiske tapene, men vil gi et inntrykk av om pumpetap er en aktuell årsak til at det forekommer akselerasjonstap i en brønn.

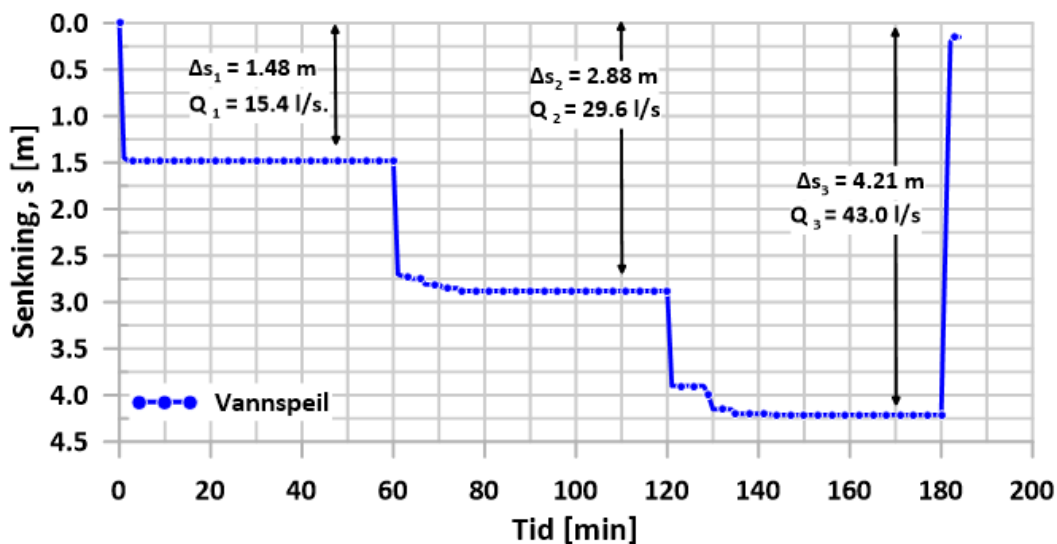
Resultater

Senkningsdataene fra Heimernesan-brønnen er gitt i Figur 6. Etter oppstart av pumpen (ved tid = 0) sees hvert trinn som et tydelig hopp i grafen. Senkningskurven stabiliseres svært fort for første trinn, og den er stabil etter ca. 20 minutters pumpetid for trinn 2 og 3. Det er tydelig at brønnen har et lineært kapasitetsforløp hvor senkningen øker proporsjonalt med pumperaten.

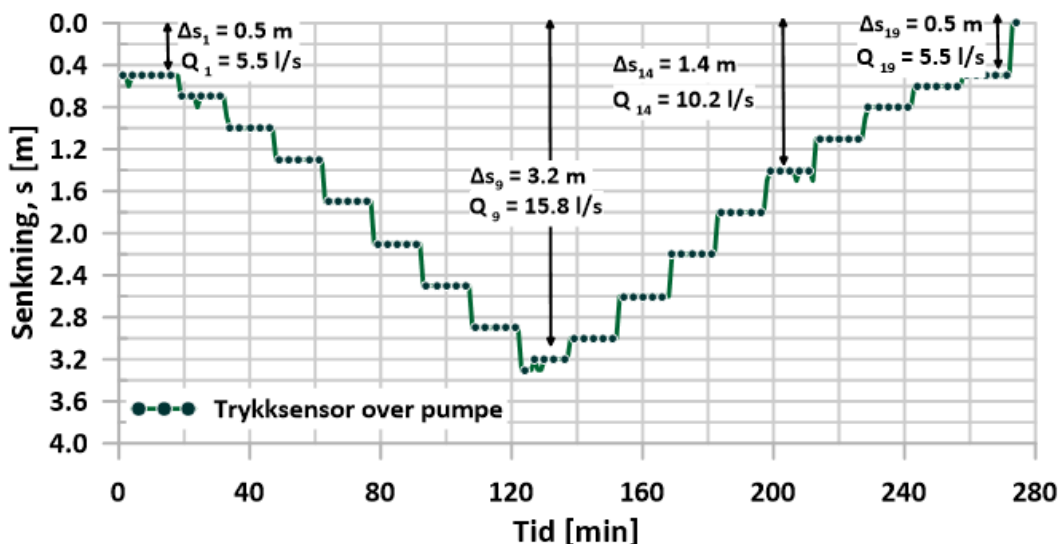
I Figur 7 sees senkningsdataene fra Melhus-brønnen. Ved tid = 0 er pumpen innstilt på laveste nivå, som er 5,5 l/s ved 30 Hz. Hvert påfølgende trinn gir et tydelig hopp i grafen frem mot 50 Hz raten, som er 15,8 l/s ved trinn 9. Deretter sees en gradvis nedtrapping mot nullpunktkalibreringen når pumpen skrur av til slutt etter 270 minutter. Senkningskurvene stabiliseres etter ca. 5 minutters pumpetid for alle trinn, men en viss fluktusjon forekommer ved den største raten ved trinn 9.

Brønnen har et ulineært kapasitetsforløp, hvor senkningen øker forholdsvis mer enn hva pumperaten skulle tilsi ved lineære driftsbetingelser. Dette betyr at det forekommer akselerasjonstap i brønnen, noe som indikerer at vannhastigheten nødvendigvis må være relativt stor i deler av brønnen eller i akviferen. Sammenlignet med Heimernesan-brønnen, som har 1,48 m senkning ved 15,4 l/s pumperate, har Melhus-brønnen over dobbelt så stor senkning ved ca. samme pumperate, som er 3,2 m senkning ved 15,8 l/s.

Senkningsdataene fra Lillemoen-brønnen sees i Figur 8. Etter oppstart av pumpen sees hvert trinn som et tydelig hopp i grafen, men ulikt de foregående grafene, er ikke senkningskurven stabilisert ved de to første trinnene. Etter 45 minutters pumpetid har senkningen for trinn 1 og 2 en tydelig logaritmisk avtakende trend (stiplede trend-kurver etter hvert trinn). Stabil senkning oppnås kun i trinn 3 etter 16 timers pumpetid (> 1000 min).



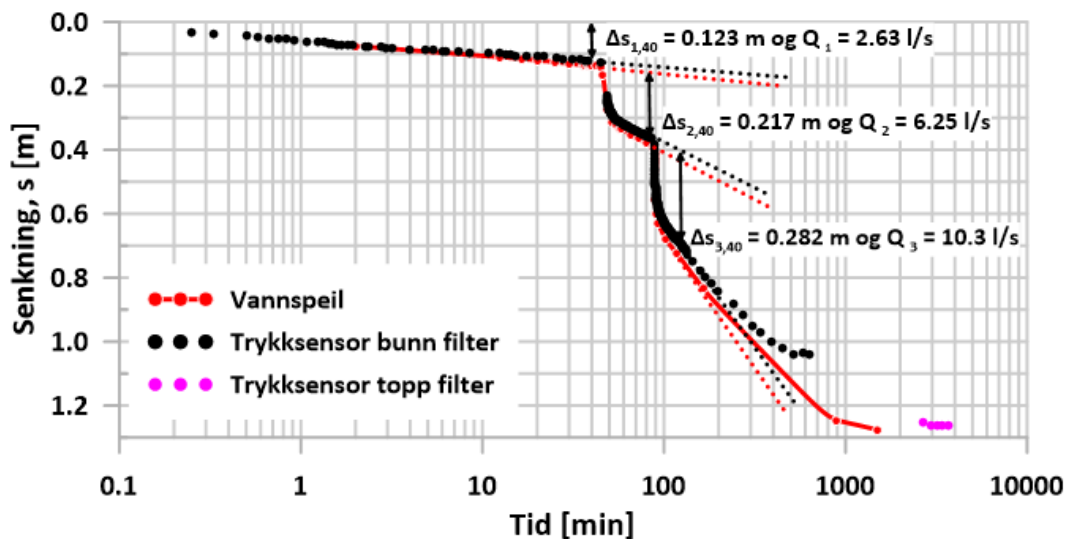
Figur 6. Trinntest av produksjonsbrønnen ved Heimernesan. Senkningen er målt med målesnelle med lydlodd. Senkningen oppnår stabilt forløp etter ca. 20 minutter for trinn 2 og 3. Datapunkter for bruk i Hantush-Bierschenks metode er uthevet.



Figur 7. Trinntest av produksjonsbrønnen ved Lena Terrasse i Melhus. Senkningen er målt med Siemens Sitrans LH100 installert rett over pumpen. Datapunkter for bruk i Hantush-Bierschenks metode er uthevet.

Sensordataene viser at brønnens senkningsforløp er avhengig av hvor i brønnen man måler senkningen. Sensoren i bunnen av filteret (sorte data) oppnår stabil senkning tidligere (ca. ved 500 min). Den har et noe mindre utslag sammenlignet med måling av selve vannspeilet i brønnrøret (røde data). Denne forskjellen fremheves også på de logaritmiske trendlinjene hvor alle

røde trendlinjer ligger under de sorte. Etter tid = 700 minutter total pumpetid, har trykksensoren stabilisert seg ved $s = 1,05 \text{ m}$ (sorte data). Sensoren ble da løftet ut av brønnen og reinstallert i overkant av filteret (rosa data). Senkningen som registreres av sensoren viser da tilnærmet likt nivå ($s = 1,25 \text{ m}$) som for målinger med målesnellen ($s = 1,27 \text{ m}$). Dette antyder en liten forskjell i



Figur 8. Trinntest av produksjonsbrønnen ved Lillemoen Skole i Elverum. Senkningen er målt ved tre ulike plasser i brønnen, med Trykksensor MiniDiver TD14 ved bunnen og ved toppen av brønnfilteret og med målesnelle med lydlodd ved vannspeilet. Datapunkter for bruk i Hantush-Bierschenks metode er uthevet.

Tabell 2. Brønnytelsler for produksjonsbrønnene ved testenes maksimale pumperate.

	Pumperate [l/s]	Filterør*: gjennomsnittlig vannhastighet	Brønnrør: gjennomsnittlig vannhastighet	V**: gjennomsnittlig vannhastighet	Stabil senkning	Pumpetap*** ligning (3)
Heimernesan (ID-86189)	43,0	2,15 cm/s	80,6 cm/s	104,8 cm/s	4,21 m	$K_L = 0,2$ 1,1 cm
Melhus (ID-87103)	15,8	1,79 cm/s	76,8 cm/s	339,8 cm/s	3,20 m	$K_L = 0,96$ 56,7 cm
Lillemoen (ID-95774)	10,3	0,78 cm/s	30,6 cm/s	55,1 cm/s	1,27 m	$K_L = 0,42$ 0,8 cm

* Pumperaten er fordelt jevnt over den perforerte delen av filterrøret.

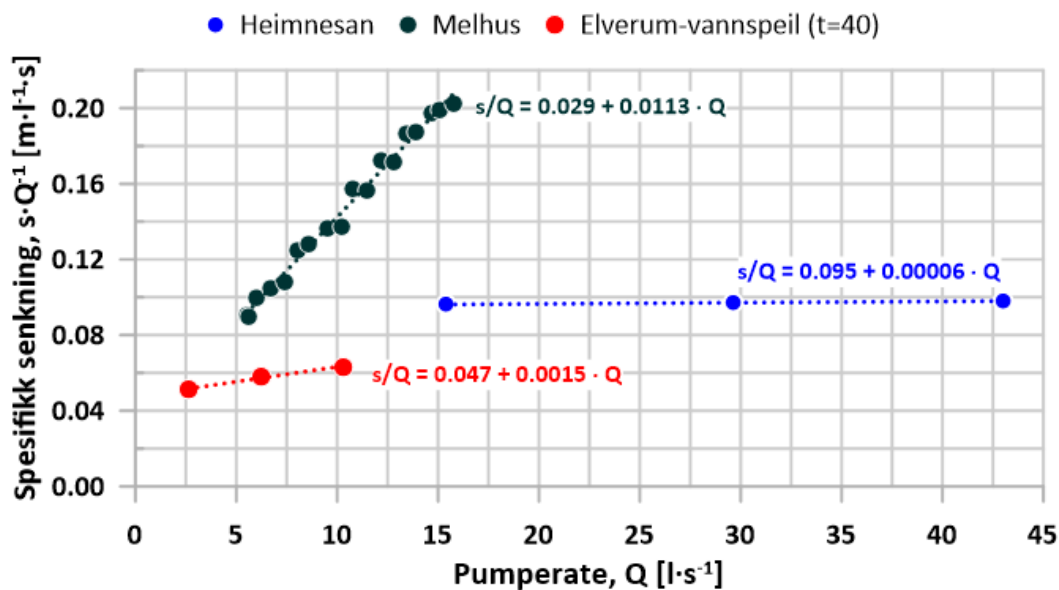
** Gjennomsnittlig hastighet for vannet forbi pumpens motor for bruk i ligning (3).

*** Estimert senkning som følge av akselerasjon forbi pumpen ved hastigheten V.

senkning avhengig av hvor i brønnen senkningen måles. Sammenlignet med Melhus-brønnen for de tidsuavhengige dataene, som i denne testen kun gjelder trinn 3 ved tid > 1000 min, har Lillemoen-brønnen noe lavere senkning, 1,27 m stabil senkning ved 10,3 l/s, enn trinn 14 for Melhus-brønnen, som har 1,4 m stabil senkning ved 10,2 l/s.

Brønnenes driftsdata ved maksimal pumperate er gitt i Tabell 2. Den største gjennomstrømningshastigheten gjennom brønnfilteret er 2,15 cm/s og forekommer i Heimernesan-brønnen.

Brønnene i Melhus og Lillemoen har henholdsvis 1,9 cm/s og 0,78 cm/s. Det vil si at alle brønnene har hastighetsverdier innenfor hastighetskriteriet på 3,0 cm/s. Heimernesan-brønnen har også størst vannhastighet i brønnrøret, men dette endres når vannet må passere innsnevringen ved senkepumpen. Det er da Melhus-brønnen som har størst endring i vannhastighet forbi pumpemotoren, og hastigheten øker fra 0,768 m/s til 3,398 m/s, en økning på over 442 %. For Heimernesan-brønnen og Lillemoen-brønnen er den tilsvarende øknin-



Figur 9. Spesifikk senkning beregnet med Hantush-Bierschenks metode for Heimnesan-, Melhus- og Lillemoen-brønnen. Konstantene B og C fremgår av ligningene i figuren for hver test.

gen betydelig lavere, på henholdsvis ca. 130 % og ca. 180 %. Det er kun Melhus-brønnen som får betydelig bidrag fra dette pumpetapet, estimert opptil 56,7 cm senkning med ligning (3), mens Heimernesan- og Lillemoen-brønnen får neglisjerbare tap sammenlignet med den totale senkningen.

Resultatene fra Hantush-Bierschenks metode sees i Figur 9, hvor spesifikk senkning (s/Q) er plottet mot pumperaten for hvert trinn av testene. Heimernesan-brønnen skiller seg ut ved at alle trinnene plotter tilnærmet horisontalt, som viser at det ikke forekommer signifikante, ulineære strømningsbidrag i senkningsdataene ($C \approx 0$).

Diskusjon

De presenterte trinntestene viser brønnnytelsene for tre forskjellige rørbrønner installert i sand- og grusakviferer i Norge. Trinntestmetodikkens formål er å fremskaffe et datagrunnlag som beskriver brønnens ytelse som funksjon av pumperaten, gjerne i form av brønnligningene vist i Figur 9. Disse ligningene tillater driftspersonell å forskutere senkningen i brønnen ved ulike produksjonsnivåer, også nivåer utenfor de testede pumperatene. Det kan settes begrensning

ger på uttaksmengden, slik at brønnen ikke driftes ved for høyt uttak. Til tross for at brønnene er plasserte i relativt like løsmassetypene og med forholdsvis like brønnfiltre, filterlengder og pumpeplasseringer, viser testene tre svært ulike testresponser. Det er vist både lineære og ulineære senkningsforløp, samt én tidsavhengig og to tidsuavhengige senkningsforløp i disse datasettene. Denne variasjonen viser hvorfor det er viktig at kapasitetstester gjennomføres og dokumenteres på en oversiktlig og systematisk måte.

Tolkningen av slike data er imidlertid utfordrende og forutsetter god kjennskap til de lokale grunnforholdene og brønnutformingene. Ved å sammenligne brønnespesifikasjonene i Tabell 1 og brønnnytelsene i Tabell 2, sees det ikke noen tydelig trend for at hverken størrelsen på filterets slisseåpninger, brønnradius eller totale filterlengde spiller en avgjørende rolle for om det forekommer akselerasjonstap i brønnresponsen (dvs. $C \cdot Q^2 > 0$). Det er gjerne disse brønnparameterne som er antatt å styre opptredende av "filtertap" eller "brønntap" i form av deres innflytelse på strømningshastigheten mot brønnen. Dataene viser at det er Heimernesan-brønnen som har størst gjennomsnittlig hastig-

het på 2,15 cm/s, uten at det oppstår ”filtertap” av den grunn. Melhus-brønnen har størst andel av akselerasjonstap av de tre brønnene. Ligning (4) tyder på at Melhus-brønnen kan ha en betydelig andel av senkningstap som skyldes endring til høy hastighet rundt pumpens motor, anslått 56 cm ved 15,8 l/s, men dette forklarer kun omtrent 18 % av den totale senkningen i brønnen. De to andre brønnene har ingen signifikante bidrag fra strømmingen rundt pumpens motor.

Det er derfor sannsynlig at de ulike brønnytelsene i all hovedsak ikke skyldes utformingen av brønnen, men kommer av forskjeller i de lokale løsmassenes hydrauliske egenskaper og de ulike akviferenes størrelse og randbetingelser. Én påfallende forskjell for Heimernesan-akviferen, er at brønnen står i umiddelbar nærhet til Søgneelven, ca. 15 meter unna, samtidig som at vannstanden i akviferen ligger godt over øvre filterkant. Den korte avstanden til elven og den tykke vannmettede sonen bidrar kanskje til at grunnvannet har både relativt kort avstand til den positive randbetingelsen, samt relativt treg strømningshastighet i størstedelen av vannets transport mot brønnen. For Melhus- og Lillemoen-brønnen er det imidlertid mer enn 600 meter til nærmeste elv, samtidig som vannstanden bare er henholdsvis ca. 6 meter og ca. 4 meter over filterkanten før pumpestart. Den lange avstanden til elven og den begrensede vannmettede sonen bidrar kanskje til at grunnvannet her får relativt høyere strømningshastigheter over lengre avstander. Det kan være utslagsgivende for at disse to brønnene får betydelig andeler «filtertap» i sine brønnytelsener.

I utgangspunktet opererer alle tre brønnene innenfor designkriteriet for 3,0 cm/s for kritisk filterhastighet. Til tross for dette er det kun Heimernesan-brønnen som opererer med en lineær brønnytelse. En sammenligning av brønnligningen til Melhus- og Heimernesan-brønnen ved 15 l/s viser at andelen ulineære senkningsbidrag ($C \cdot Q^2$) utgjør over 84 % total senkning i Melhus-brønnen, men mindre enn 1 % i Heimernesan-brønnen ved tilsvarende rate. Dette tyder på at det forekommer svært ulike

strømningsregimer i disse to brønnene ved samme produksjonsrate, noe som antyder at dimensjoneringskriteriet på 3,0 cm/s ikke nødvendigvis er tilstrekkelig for sikre en lineær brønnytelse. Denne observasjonen er nyttig å ta i betraktning når nye brønner skal dimensjoneres, og det kan stilles spørsmål ved om dette er et fornuftig dimensjoneringskriterium i så henseende. Andre dimensjoneringskriterier og brønnskonfigurasjoner er drøftet i Houben & Hauschild (2011) og Van Beek (2011), hvor bedre brønnytelsener oppnås ved å f.eks. endre pumpens plassering i brønnen.

Konklusjoner

Det er presentert trinntester for tre filtersatte rørbrønner i forskjellige sand- og grusakviferer i Norge. Til tross for at brønnene er plasserte i relativt like løsmassetyper og med forholdsvis lik brønnutrustning, viser testene svært ulike testresponser, med både lineære og ulineære senkningsforløp, samt én tidsavhengig og to tidsuavhengige senkningsresponser i datasettene. Denne variasjonen viser hvorfor det er viktig at brønntester gjennomføres og dokumenteres på en oversiktlig og systematisk måte. Testene viser at alle tre brønnene opererer innenfor designkriteriet med 3,0 cm/s for kritisk filterhastighet, men det er kun én brønn som har en lineær brønnytelse. Dette tyder følgelig på at dimensjoneringskriteriet på 3,0 cm/s ikke nødvendigvis er tilstrekkelig for å sikre en lineær brønnytelse.

Takksgelser

Vi vil rette en stor takk til Mari Vestland ved Norges Geotekniske Institutt for diskusjon og korrekturlesing. For øvrig vil vi også takke Regionale Forskningsfond Trøndelag og NTNU for finansiering av forskningen som i sin tid bidro til data gjennom ORMEL-prosjektet.

Referanser

Bierschenk, W.H.; (1963) *Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests*. Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ. 64, pp. 493-507.

Driscoll, F. G., (1986) *Groundwater and Wells*. 2nd ed., St Paul, Minn: Johnson Division. 1089 pp.

Fetter, C. W. (2001) *Applied Hydrogeology*. 4th ed., Upper Saddle River, N.J.: Prentice-Hall, 598 pp.

Forbord, R.E.; (2016) *Resultater etter 14,5 måneders prøvepumping av grunnvannsbrønner ved Heimernesan*. Utgave 2. Stjørdal: Asplan Viak.

Gjengedal, S.; Stenvik, L.A.; Ramstad, R.K.; Ulfsnes, J-I.; Hilmo, B. O.; Frenstad, B. S.; (2021) *Online remote-controlled and cost-effective fouling and clogging surveillance of a groundwater heat pump system*. Bull Eng Geol Environ 80, pp. 1063–1072.
<https://doi.org/10.1007/s10064-020-01963-z>

Hantush, M.S.; (1964) *Hydraulics of wells*. Part of book: V.T. Chow (editor). *Advances in Hydroscience*, Vol. I, pp. 281-432. Academic Press, New York and London

Houben, G.J.; Hauschild, S.; (2011) *Numerical Modeling of the Near-Field Hydraulics of water wells*. Groundwater. Vol. 49. Issue 4. pp. 570-575.

Kruseman, G. P.; De Ridder N. A.; (1994) *Analysis and evaluation of pumping test data*, 2nd ed. Wageningen, International Institute for Land Reclamation and Improvement.

NGU (2016) *Grunnvann i Norge. Brønnboring*. Trondheim: Norges Geologiske Undersøkelse. Tilgjengelig fra: http://www.grunnvanninorge.no/bore_boring.php#bronnutforming

Rorabaugh, M.J.; (1953) *Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well*. Proceedings. Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 79, separate no. 362, 23 pp.

Rennels, D.C., Hudson, H.M. (2012) *Pipe Flow—A Practical and Comprehensive Guide*, 1st edn. Wiley & Sons Inc., New Jersey.

Van Beek, C. G. E. M; (2011) *Cause and prevention of clogging of wells. Abstracting groundwater from unconsolidated aquifers*. PhD Thesis, Vrije University, Amsterdam.