Borgerinddragelse i vandforvaltning

Et stort vandselskab vil lukke et gammelt vandværk inde i byen for at spare penge. Effekten på grundvandsniveauet af at stoppe indvindingen er dårligt belyst i mangel af lokale data. Grundejerne frygter stigende grundvand i kældre og haver. Lovgivningen hindrer, at kommune og vandselskab kan hjælpe grundejere med afværgeforanstaltninger. Kan borgerinddragelse hjælpe i en sådan interessekonflikt?

Jens Christian Refsgaard, Olaf Berg, P.S. Ramanujam, Henrik Anthony, Henriette Jakobsen, Steffan Alexander Thule Madsen, Henrik Correll & Jeppe Eriksen

Historien om lukning af Haraldsborg Vandværk

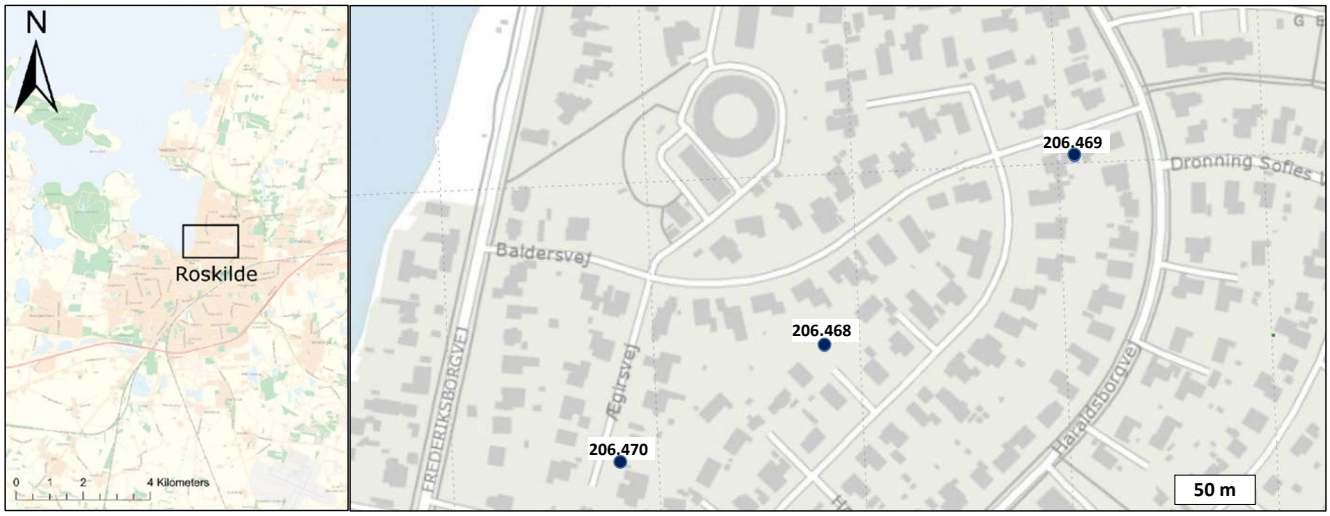
Haraldsborg Vandværk og de tre tilhørende indvindingsboringer ligger i dag i et villakvarter i Roskilde by (Figur 1). Oprindeligt var området et mose- og engdrag med et naturligt grundvandsspejl ved eller tæt på terræn. Området blev langt overvejende bebygget fra 1962, hvor vandværket blev taget i brug. Indtil 1992 blev der indvundet ca. 600.000 m^3/år, hvorefter oppumpningen gradvist blev reduceret til ca. 130.000 m^3/år de seneste år. Vandindvindingen skete fra et kalkmagasin i 50 m dybde, hvor grundvandstrykket blev sænket adskillige meter.

I 2005 orienterede Roskilde kommune 550 grundejere om, at værket ville blive lukket, og at konsekvenserne ville være, at grundvandsniveauet vil vende tilbage til sit naturlige niveau fra før 1962 og i værste tilfælde komme i niveau med terræn, samt at det ændrede grundvandsniveau kunne få betydning for ejendomme med kælder og uden omfangsdræn. Det medførte voldsomme borgerprotester. Roskilde kommune besluttede derfor at stille nedlæggelse af værket i bero. Grundejerne fik desuden et løfte om, at hvis der senere skulle blive tale om at stoppe oppumpningen, ville det først ske efter fornyede tekniske vurderinger og forudgående dialog med grundejerne.

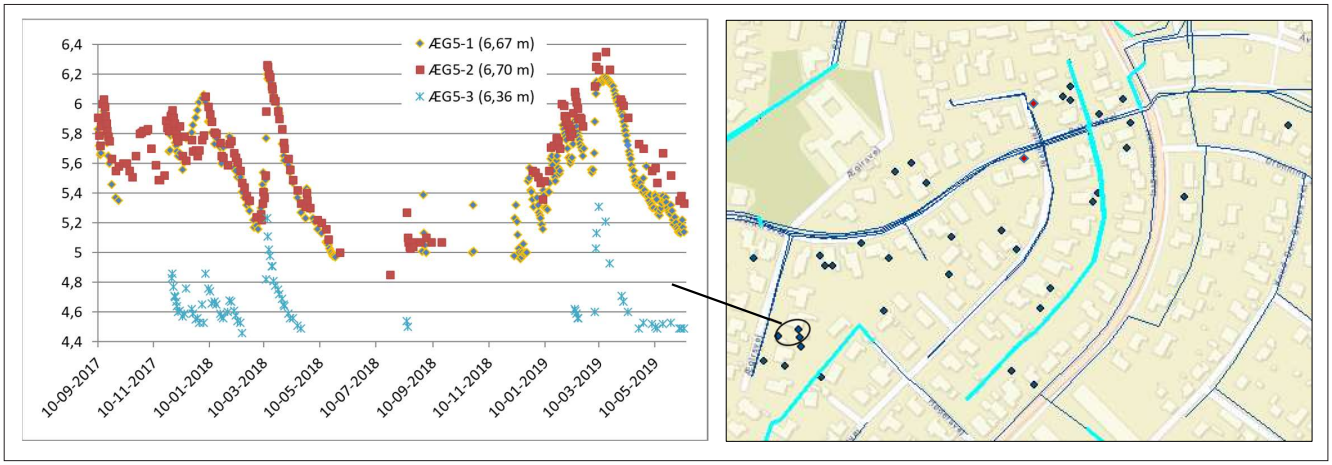
Herefter hører grundejerne ikke noget til sagen før 2017. I mellemtiden var vandforsyningen overgået fra at være en kommunal driftsopgave til at blive varetaget af Fors A/S, som ejes af Roskilde, Lejre og Holbæk kommuner. Fors er underlagt statslig regulering med effektiviseringskrav på 2-4 procent hvert år. Eftersom Fors har tilstrækkelig vand i sit nyere og større vandværk i Hornsherred, og Haraldsborg Vandværk derfor ikke længere er nødvendig, vil det være god økonomisk logik at nedlægge værket.

Fors varsler derfor i februar 2017 via brev til 165 grundejere, at vandværket lukker pr. 1. september 2017. Ud fra en modelberegning vurderedes det, at "grundvandsniveauet i gennemsnit maksimalt vil stige ca. 30 cm", og "det kan ikke afvises at helt lokale forhold kan medføre, at det fremtidige grundvandsniveau i værste tilfælde vil få betydning for enkelte ejendomme med kældre og uden omfangsdræn". I samme brev redegøres for, at Fors i henhold til gældende lovgivning ikke er erstatningspligtig.

Den varsling gav anledning til stor indignation og bekymring hos grundejerne, som etablerede en "Vandgruppe" med førsteforfatte-



Figur 1. Området omkring Haraldsborg Vandværk i Roskilde og de tre tilknyttede vandværksboringer. Figurer fra /1/ og Jupiter.



Figur 2. Placeringen af 38 af de 40 pejleboringer. De blå streger viser placeringen af Fors' spildevands- og regnvandsledninger. De to sidste boringer er placeret 600 m nord for kortets øverste rand og fungerer som referenceboringer, idet de ikke påvirkes af oppumpningen fra Haraldsborg Vandværk. Figuren til venstre viser pejledata for en to årsperiode fra tre boringer på samme grund.

ren som faglig bisidder. Vandgruppens vurdering var, at modelberegningerne ikke var pålidelige, bl.a. fordi der ikke findes data om terrænnært grundvand i området.

Uanset at lukningen af Haraldsborg Vandværk blev varslet fuldt lovligt, følte grundejerne, at de blev uanstændigt behandlet, fordi 1) løftet fra 2005 om forudgående dialog med grundejerne ikke blev holdt, 2) vurderingen af konsekvenserne var faglig utilstrækkelig, og 3) der var ingen anvisninger på løsninger på evt. problemer. Tværtimod tillader den eksisterende lovgivning ikke, at vandselskaber eller kommuner hjælper med kollektive afværgeforanstaltninger. Dvs. at grundejerne med seks måneders varsel blev bedt om hver især at vurdere, om de fik et problem og i givet fald skaffe flere hundrede tusinde kroner til at etablere omfangsdræn. Mange grundejerne betragtede det som et overgreb, at et forsyningsselskab uden ansvarspådragelse kan ophøre med vandindvinding efter 55 år i et område, hvor bebyggelsen delvist beroede på vandindvinding.

Borgerinddragelse

Efter et velbesøgt og stormfuldt informationsmøde hos Fors i marts 2017 blev der etableret en dialog mellem Vandgruppen, Fors og Roskilde Kommune. Her medgav Fors, at det faglige grundlag (modelberegningerne) ikke kunne anses som tilstrækkeligt til at vurdere stigning i grundvandsstand.

Herefter diskuterede vi, hvordan vi kunne skaffe et bedre beslutningsgrundlag, som ville give troværdighed også blandt grundejerne. En af mulighederne var en rådgiverundersøgelse med en mere detaljeret lokal model. En sådan undersøgelse ville have den fordel, at den kunne gennemføres i løbet af få måneder. Efter forslag fra Vandgruppen blev det besluttet i stedet at lave en undersøgelse, hvor både grundejerne og Fors deltog aktivt:

- Et antal grundejerne skulle etablere en række pejleboringer i deres haver og løbende pejle grundvandsstanden.
- Fors skulle variere oppumpningen over en 3-års periode mellem ingen oppumpning og 400.000 m^3/år. Ideen med pumpeeksperimentet var at observere, hvorvidt effekten af en ændret oppumpning kunne ses i pejleboringerne. Fors skulle derudover undersøge indstrømning af vand til kloak og regnvandsledninger i området.
- GEUS og Københavns Universitet udbød et specialeprojekt, hvor en geologistuderende kunne arbejde med data fra pumpeeksperimentet og gennemføre egne felt- og modelundersøgelser. Vi var så heldige at kunne tilknytte Jeppe Eriksen, som gennemførte sit kandidatspeciale fra efteråret 2018 til efteråret 2019 /1/.

Gennemførelse af undersøgelsen forudsatte tilladelse fra Roskilde Kommune til fortsat at udlede oppumpet grundvand fra Haraldsborg Vandværk via regnvandsledning til Roskilde Fjord. Den tilladelse blev givet i april 2018, idet Fors og Vandgruppens forslag til projektperiode, uden forudgående dialog eller begrundelse, dog blev afkortet med et år, således at undersøgelsen forudsattes færdiggjort i august 2020.

Udover Vandgruppens afgørende bidrag til design af undersøgelsen, deltog gruppen aktivt i det feltarbejde, der blev gennemført i specialeprojektet, samt i en række møder, hvor resultater af feltarbejde og modellering blev fremlagt og diskuteret. Vandgruppen kommunikerede med områdets grundejere i form af regelmæssige nyhedsmails og almindelig nabosnak. Fors lavede en hjemmeside, hvor referater og resultater blev gjort offentligt tilgængelige /2/. Udover det indledende borgermøde i marts 2017 blev der afholdt to velbesøgte borgermøder i maj 2018 og august 2020. Resultaterne blev afrapporteret i en teknisk rapport /3/ og pejledata er efterfølgende indrapporteret til den nationale boringsdatabase Jupiter.

Borgerdrevet pejlenetværk

Vandgruppen fik etableret 40 pejleboringer fordelt på 20 matrikler (Figur 2). Boringerne blev lavet ved hjælp af et pælebor og et 3 m håndbor. Boringerne er mellem 118 og 265 cm dybe og filtersat med et 50 mm filterrør fra Rotek og efterfyldt med filtersand langs filterrøret. En enkelt boring blev kontinuerlig logget med en ultralydssonde, mens de øvrige blev aflæst manuelt – et par stykker dagligt, andre et par gange om ugen og nogle en gang imellem. I alt blev der indsamlet ca. 6.000 pejledata mellem efteråret 2017 til foråret 2020. De enkelte grundejere indrapporterede data til et fælles google doc excel ark. Dataene blev efterfølgende kvalitetssikret. Dette arbejde blev inspireret og koordineret af Vandgruppen.

Læring fra feltarbejde og dataanalyse

Den aktive deltagelse i feltarbejdet og tolkningen af data resulterede naturligt i en bedre forståelse af områdets hydrogeologi blandt alle involverede parter.

Feltarbejdet med boringer (Figur 3) og geoelektrik gennem flere baghaver havde til formål at tjekke den nøjagtige beliggenhed af et sandlag, der ifølge borerapporterne for de tre vandværksboringer fra 1957, skulle findes i 8-10 m dybde. Feltarbejdet viste, at det sandlag ikke eksisterer.

Figur 3. Rolige og mindre rolige øjeblikke fra borearbejdet med GEUS' borerig.

Pejledata viste tydelige årstidsvariationer og store forskelle i grundvandsniveau internt på de enkelte matrikler. Figur 2 viser eksempelvis, at grundvandet ligger markant dybere i den boring på Ægirsvej 5, som ligger tættest på vejen, end i de to andre boringer på grunden. Det gav anledning til en hypotese om, at rør eller rørtraceer fra kloak, regnvand eller fjernvarme i vejene har en drænende virkning. En analyse af sammenhængen mellem dybden til grundvand og afstanden fra boring til nærmeste rør (Figur 4) bekræfter, at der er en statistisk signifikant sammenhæng. Den ikke specielt høje korrelationskoefficient i Figur 4 viser dog at andre faktorer, som fx lokal variation af jordens beskaffenhed, også påvirker grundvandsstanden.

De umiddelbart mest relevante data er pejledata fra de tidspunkter af året, hvor grundvandsstanden er tættest på terræn. Data fra disse maksimale grundvandsniveauer er vist i Tabel 1 for de 13 boringer, hvor der er data fra 3 vintre. Som det fremgår af nederste række i tabellen, var oppumpningen 130.000 m³/år i 2018. 1. februar 2019 blev pumperaten tredoblet. Det var derfor med ekstra stor opmærksomhed, at grundejerne pejlede grundvandsstanden i de efterfølgende uger for at se, hvorvidt effekten af den øgede oppumpning kunne registreres i form af fald i grundvandsstanden. Den effekt viste sig ikke. Til gengæld begyndte det at regne voldsomt i marts, hvorefter grundvandsstanden steg kraftigt. Læringen heraf var, at kraftig regn formentlig udgør en større risikofaktor end ændret oppumpning.

Tabel 1. Maksimale grundvandsniveauer for hvert af årene 2018-2020 observeret i de af Vandgruppens pejleboringer, der har data fra alle tre vintre. De to referenceboringer (ST44-1, ST44-2) er beliggende 800 m nord for Haraldsborg Vandværk og forventes at være upåvirket af ændret oppumpning.

Boring	2018		2019		2020	
	Dato	Dybde (cm)	Dato	Dybde (cm)	Dato	Dybde (cm)
B10-1	03/01/18	25	13/03/19	19	26/02/20	19
B10-2	03/01/18	42	13/03/19	31	26/02/20	33
Æ5-1	03/01/18	61	17/03/19	49	26/02/20	50
Æ5-2	05/01/18	65	17/03/19	35	19/02/20	41
Æ5-3	05/01/18	150	09/03/19	105	18/02/20	132
Æ7-1	13/03/18	71	17/03/19	57	26/02/20	46
Æ7-2	13/03/18	66	17/03/19	63	26/02/20	68
Æ7-3	13/03/18	90	17/03/19	102	17/02/20	98
V50-1	05/01/18	129	17/03/19	130	26/02/20	137
V50-2	05/01/18	147	05/03/19	128	26/02/20	142
V50-3	05/01/18	135	05/03/19	119	26/02/20	130
Gennemsnit alle boringer i området		**89**		**76**		**81**
ST44-1	04/01/18	115	17/03/19	105	26/02/20	108
ST44-2	17/03/18	161	17/03/19	145	26/02/20	150
Gennemsnit referenceboringer		**138**		**125**		**129**
Nedbør (7 dage)*	34 mm / 56 mm		56 mm		47 mm	
Nedbør (30 dage)*	76 mm / 67 mm		138 mm		147 mm	
Oppumpning	130.000 m3/år		400.000 m3/år		0 m3/år	

* Akkumuleret nedbør for henholdsvis 7 dage og 30 dage forud for dato for max grundvandsspejl

Tabel 1 viser, at dybden til grundvandsspejlet – opgjort som gennemsnit over de 11 boringer i området - for de dage, hvor grundvandet stod højst i de tre år, var henholdsvis 138 cm (2018), 125 cm (2019) og 129 cm (2020). Det vil sige, at grundvandsniveauet var højest i det år (2019), hvor der var den største oppumpning men også den kraftigste nedbør. Tilsvarende var grundvandsniveauet ikke lavest i det år med den største oppumpning, men i det år med den mindste nedbør (2018). Samme tendens kan ses i de to referenceboringer, der er beliggende udenfor det område, der påvirkes af oppumpningen. Data fra pejlenetværket viser således entydigt, at effekten af nedbørsvariationer er meget mere dominerende end effekten af varierende oppumpning. Det betyder ikke, at en ændret oppumpning ikke har nogen effekt på grundvandsniveauet, men kun at det ikke var muligt blot ved at kigge på data at estimere en sådan effekt, fordi effekten sløres af "støj" fra varierende nedbør. Effekten er blevet vurderet ved hjælp at modelberegninger /4/.

Værdien af citizen science

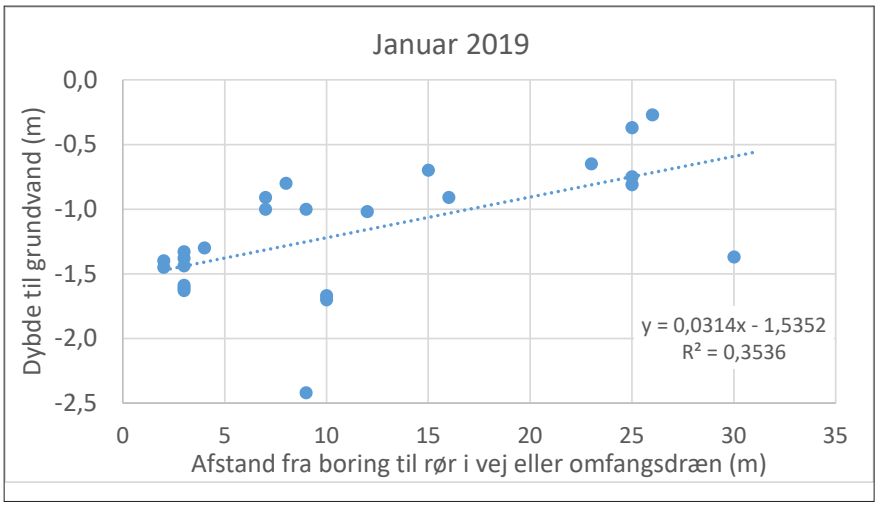
Undersøgelsen har været gennemført i et tæt samarbejde mellem Fors og de lokale grundejere repræsenteret ved Vandgruppen.

Udgangspunktet i februar 2017 efter varslet om lukning var en betydelig skepsis blandt grundejerne. Efter en indledende, konfliktfyldt fase blev der gradvist opbygget et godt tillidsforhold, som resulterede i beslutningen om, at Fors lavede pumpeeksperimentet samtidig med, at grundejerne etablerede og drev pejlenetværket. Borgerinddragelsen har haft mange positive aspekter:

- Det ville ikke have været økonomisk realistisk at lave så mange boringer i private haver med så stor dataindsamling og analyser, hvis det skulle gennemføres på traditionel måde med brøndborefirmaer og rådgivende ingeniørfirmaer. Med en dataindsamling, der kun omfattende enkelte boringer i nogle få villahaver, ville vi ikke have haft datagrundlag til at vurdere de meget betydelige forskelle i grundvandsforhold mellem grundene og inden for den enkelte grund, og vi ville ikke have haft data til at dokumentere den drænende effekt af rørtraceer.
- Grundejerne har bidraget med meget lokal viden, fx om hvilke huse, der har omfangsdræn, og hvor dybt de ligger, hvor der er stikledninger, hvor der er eller tidligere har været vandproblemer, hvad folks holdninger er til forskellige problemstillinger, mv.
- Vandgruppen har bidraget aktivt med ideer og beslutninger om den konkrete udformning af pumpeeksperimentet.
- Den daglige/ugentlige indsats med måling af grundvandsspejl på egen grund og (for Vandgruppens vedkommende) deltagelse i planlægningen af måleprogram og pumpeeksperimentet samt løbende deltagelse i diskussioner af resultater fra dataanalyser og modelarbejde har resulteret i en væsentlig bedre forståelse af grundvandsforholdene. Det har medført en øget accept af konklusionerne, som i sidste ende byggede på modelberegninger /3/.

Der er flere forudsætninger, der skal være opfyldt, for at borgerinddragelsen kan blive en succes som i vores tilfælde:

- Der skal være nogle lokale ildsjæle med tillid blandt borgerne. Det var der i Vandgruppen.
- Borgergruppen skal have tilknyttet faglig kompetence, som den har tillid til og som kan matche fagligheden hos myndigheder/forsyningsselskaber/rådgivere. Det havde Vandgruppen i form af førsteforfatteren, som brugte nogle hundrede timer på sagen. Desuden var tilknytningen af et studenterprojekt en stor fordel, fordi det gav muskler og kompetence til at lave mere omfattende analyser, end det ellers ville have været muligt.
- Forsyningsselskabet (og kommunen) skal være indstillet på at give borgergruppen reel indflydelse på undersøgelsen. Det var Fors indstillet på at gøre indenfor de eksisterende lovgivningsmæssige rammer.



Figur 4. Dybde til det terrænnære grundvand som funktion af afstand fra boring til rør i vej eller omfangsdræn for den maksimale grundvandsstand i januar 2019. Hvert punkt repræsenterer en boring.

Sammenlignet med en traditionel rådgiverundersøgelse har vores undersøgelse med aktiv borgerinddragelsen kostet færre penge, men taget længere tid og krævet mere kaffe. Som beskrevet i /4/ er det vores vurdering, at den faglige konklusion er meget robust og derfor har givet ro i maven hos alle parter.

Hvor værdifulde er borgerindsamlede data? Kan vi stole på datakvaliteten? Kan data gøres offentligt tilgængelige? De spørgsmål hører vi ofte, bl.a. fra fagfolk, hvis job er at indsamle højkvalitetsdata. Vores klare vurdering er, at vores pejledata har en meget høj kvalitet. Vi har måttet frasortere nogle data i en kvalitetssikringsproces, men det skal man jo også gøre, når der bruges mere avancerede måleinstrumenter. Der ligger et stort uudnyttet potentiale i citizen science drevet dataindsamling. Hvis det potentiale skal udfoldes, er der behov for understøttende værktøjer og datainfrastruktur. Da vi f.eks. efterfølgende ville indrapportere pejledataene til den nationale boringsdatabase Jupiter, fandt vi ud af, at det kan almindelige borgere ikke få lov til at gøre selv. Det kan kun gøres af myndigheder og forskningsinstitutioner. Det er ikke smart.

Referencer

/1/ Eriksen, J. 2019: A Field and Model Study of the Effects of closing Haraldsborg Waterworks (Roskilde) on a rising WaterTable and Near-Surface Groundwater. Master Thesis. University of Copenhagen, 118 sider. https://www.fors.dk/wp-content/uploads/2020/07/speciale-jeppe-10.pdf?x29193

/2/ https://www.fors.dk/haraldsborg-vandvaerk/

/3/ Refsgaard, J.C. 2020: Haraldsborg Vandværk - Grundvandsproblemer. Undersøgelser af effekten af lukning af vandværk go klimaændringer på det terrænnære grundvandsspejl i området omkring Haraldsborg Vandværk, Roskilde. 74 sider. https://www.fors.dk/wp-content/uploads/2020/07/haraldsborg-teknisk-rapport-jens-christian-refsgaard-30juli2020-10.pdf?x29193

/4/ Refsgaard, J.C., Berg, O., Ramanujam, P.S., Anthony, H., Jacobsen, H., Madsen, S.A.T., Correll, H., Eriksen J. 2021: Grundvandsoversvømmelse i villakvarter? Vand & Jord, efterfølgende artikel i dette nummer.

Jens Christian Refsgaard (jcr@geus.dk), professor emeritus i hydrologi, GEUS. Faglig rådgiver for Vandgruppen.
Olaf Berg, P.S. Ramanujam, Henrik Anthony er grundejere og medlem af Vandgruppen.
Henriette Jakobsen, Fagspecialist Vand, Fors A/S.
Steffan Alexander Thule Madsen, Chef Vand & Varme, Fors A/S
Henrik Correl, Produktionsdirektør, Fors A/S
Jeppe Eriksen, hydrogeolog, lavede specialeprojekt som geologistuderende på KU i tilknytning til projektet.

Grundvandsproblemer i villakvarter?

Vil en lukning af Haraldsborg Vandværk betyde, at grundvandsstanden stiger til terrænhøjde, ligesom i tiden før vandværket og villakvarteret blev etableret? Hvilken indflydelse har rørtraceer og anden bymæssige infrastruktur for grundvandsstanden? Og hvad betyder klimaændringerne? Det har vi undersøgt med data fra et omfattende borgerdrevet pejlenetværk, feltundersøgelser og modelberegninger.

Jens Christian Refsgaard, Jeppe Eriksen, Olaf Berg, P.S. Ramanujam, Henrik Anthony, Henriette Jakobsen, Steffan Alexander Thule Madsen & Henrik Correll

Baggrund, hydrogeologi og formål

Haraldsborg Vandværk i Roskilde blev taget i brug i 1962 med en indvinding omkring 600.000 m^3/år. Historien omkring lukningen af vandværket og den aktive borgerinvolvering er beskrevet i /1/.

Geologien i området er beskrevet i /2/. Vandindvindingen foregår fra et kalklag i ca. 50 m dybde. Kalken er overlejret af Kertemindemergel, med en overliggende kvartær lagpakke bestående primært af moræneler og tynde lag og linser med sand. Figur 1 viser en konceptuel opfattelse af nogle af de forhold, der er bestemmende for vandstrømningerne i området. Kalklagene udgør et sammenhængende regionalt grundvandsmagasin. Der findes sandlag i morænen, men kun med lokal udbredelse og derfor af mindre betydning.

Formålene med undersøgelsen var at finde svar på følgende spørgsmål:

- Hvor meget vil det terrænnære grundvand stige, hvis Haraldsborg Vandværk lukkes?
- Hvor meget vil klimaændringer påvirke det terrænnære grundvand?
- Hvilken indflydelse har bymæssig infrastruktur i form af rør og rørtraceer, kældre og befæstede arealer for grundvandsforholdene?
- Hvor store variationer i grundvandsniveau er der internt på de enkelte grunde? Og hvilke helt lokale faktorer kan forklare disse variationer?

Feltundersøgelser og nye erkendelser

Som nævnt i den forrige artikel /1/ fandtes der ingen relevante data om det terrænnære grundvand i lokalområdet, da lukningen af Haraldsborg Vandværk blev varslet i februar 2017. Der blev derfor gennemført en del forskelligartede feltundersøgelser, som er resumeret i Tabel 1 og nærmere beskrevet i /2/ og /3/.

Feltarbejdet og analyse af de omfattende data har umiddelbart givet nye erkendelser:

- Hydrogeologisk forståelse – intet sandlag i lokalområdet. Borerapporter fra de tre gamle pumpeboringer 206.468, 206.469 og 206.470 etableret i 1957 viser alle, at der skulle være et sandlag af nogle meters tykkelse i 8-10 m dybde. Feltarbejdet i forbindelse med projektet afslørede, at et sandlag ikke findes, og at de gamle boreprøver/borerapporter derfor formentlig er fejltolkede.
- Hydrogeologisk forståelse – drænende effekt af rørtraceer. Rørtraceerne har en drænende effekt (se Figur 4 i /1/). De menneskeskabte dræn betyder, at det terrænnære grundvandsspejl efter lukning af Haraldsborg Vandværk vil ligge markant lavere, end det ville gøre i "naturtilstanden" fra før 1960.
- Påvirkning af det terrænnære grundvandsniveau. Som beskrevet i /1/ er det ikke muligt alene ud fra en analyse af pejledata at se effekten af ændring i oppumpning. Det skyldes, at effekten er 1-2 måneder om at brede sig gennem 50 m mergel og moræneler fra kalklaget, hvorfra pumpningen sker, op til det terrænnære grundvandsspejl /2/. Og i løbet af 1-2 måneder sker der som regel store variationer i nedbøren, som viste sig at være dominerende.

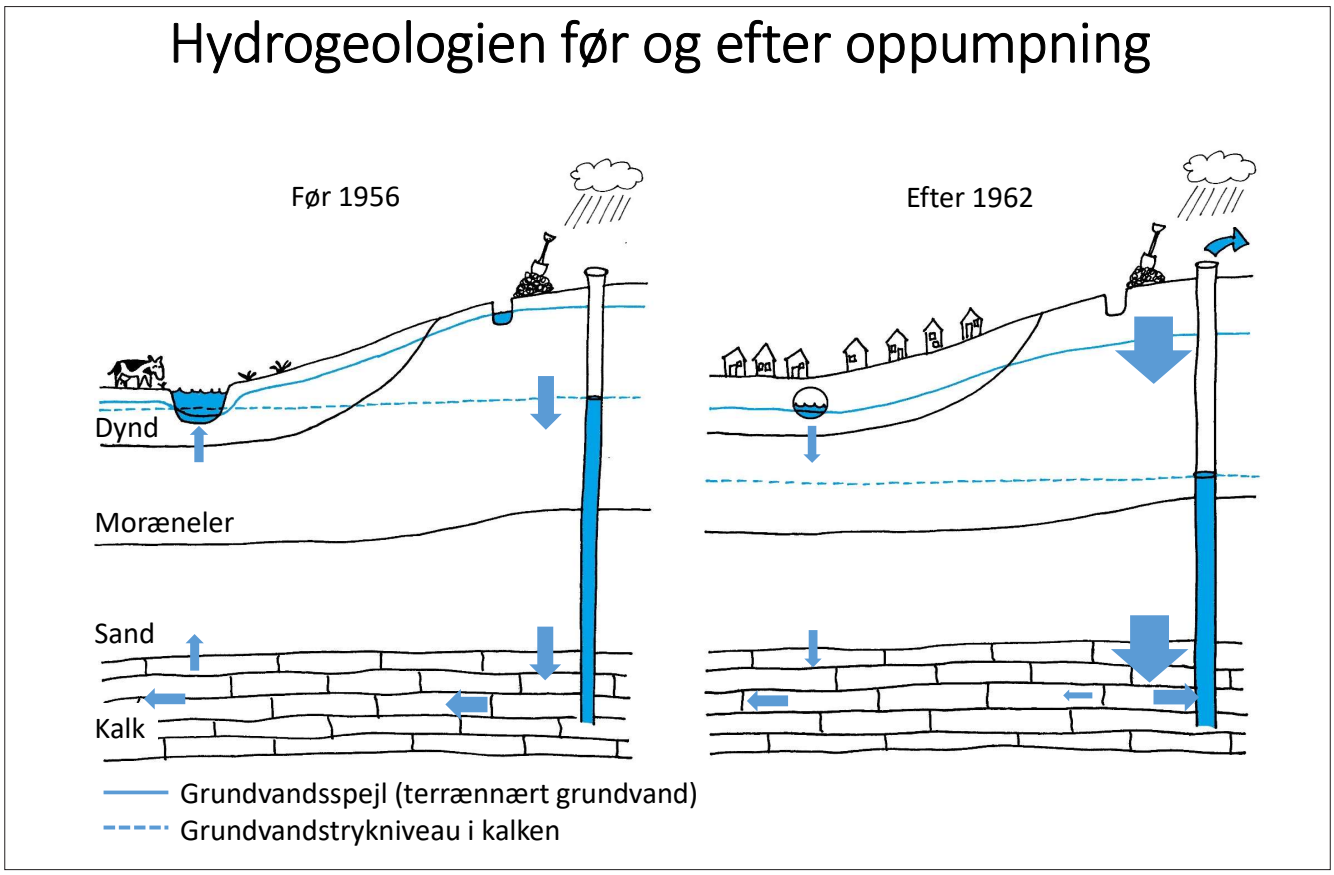
For at opnå bedre forståelse af områdets hydrogeologi og vurdere effekter af lukning af vandværket og klimaændringer blev der opstillet to meget forskellige modeller.

JE's MIKE SHE-model

Jeppe Eriksen (JE) opstillede som en del af sit kandidatspeciale /1/ en hydrologisk model baseret på MIKE SHE softwaresystemet. Modellen dækker et område på ca. 1200 m x 1200 m (Fig. 2) med et 10 m beregningsnet og ca. 50 m vertikalt med fire beregningslag, som følger geologien. Modellens afgrænsninger (randbetingelser) er:

- Top: Daglig nedbør fra DMI's nedbørsstation Nymarken, som ligger inden for området, og daglig potentiel fordampning fra DMI's 20 km grid.
- Bund: Fastholdt trykniveau i kalken fra /4/.
- I siderne mod nord, syd, øst: Lukket rand. Det er en god forudsætning mod nord og syd, hvor randen følger vandskel. Mod øst er randen ikke tæt i virkeligheden, men på grund af morænelerets lave hydrauliske ledningsevne strømmer der så lidt vand ind i modellen, at ikke det påvirker forholdene i det kritiske lavtliggende område centralt i modelområdet.
- Mod vest i Roskilde Fjord: Fastholdt trykniveau i det øverste lag svarende til kote 0 m (havspejlsniveau). Og lukket rand for de nederste tre beregningslag.

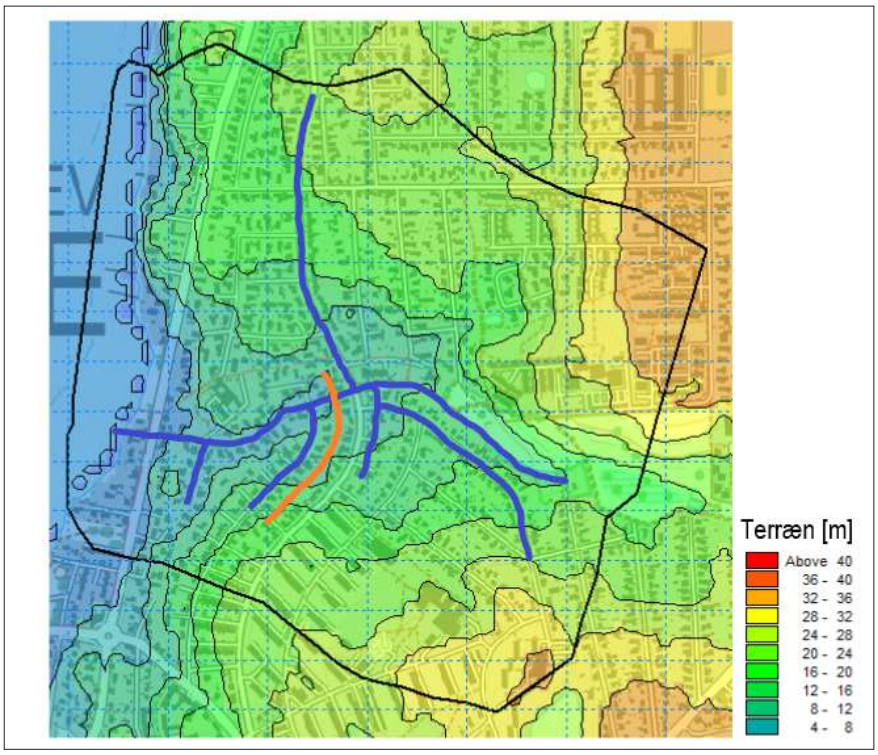
Modellen har indbygget data om befæstning



Figur 1. Konceptuel opfattelse af områdets hydrogeologi med vandets strømningsveje før og efter etablering af vandværk og villabebyggelse omkring 1960 (tegning: Julie Lawaetz Halleskov)

Tabel 1. Oversigt over feltaktiviteter

Formål	Aktivitet	Ansvarlig (Deltager)	Output / Konklusioner	Referencer
Terrænnært grundvand	Grundejerpejlenetværk 40 boringer. 118 - 265 cm dybe GPS indmåling af grundejerpejlenetværk 4 boringer på Fors' to grunde på hhv. 2 og 5 m dybde. Logning af trykniveau.	Vandgruppen og 20 grundejere Fors (Vandgruppen) Fors	6000 pejledata Gode tidsserier for 2-3 år GPS koordinater på boringer 4 boringsbeskrivelser og pejletidsserier	/1/ Figur 2 /3/ Jupiter /3/ Jupiter /3/ Jupiter
Geologi	2 boringer på Fors grund til 7 og 12 m Geoelektrik - 95 m strækning Borehulslogning af 12 m boring	KU-studerende (GEUS) (Vandgruppen)	Intet sandlag i 8-10 m dybde	/1/ Figur 3 /2/ /3/
Grundvands-trykniveau	Logning af 7 + 12 m boringer Logning af to indvindingsboringer (kalk)	KU-studerende	4 pejletidsserier	/3/
Drænende effekt af ledningsnet i vej	Analyse af tilstand af rørnet TV inspektion Ægirsvej	Fors	Fors' rør tætte. Stikledninger til nogle huse dræner grundvand	/3/
Effekt af omfangsdræn	Logning af hvor meget vand der løber ind i et omfangsdræn	En grundejer	Signifikant sammenhæng med grundvandsstand	/3/
Effekt af oppumpning på terrænnært grundvand	Pumpeforsøg - varierende oppumpning - Indtil 01.02.2019: 15 m³/time - 01.02.2019 – 04.06.2019: 45 m³/time - 04.06.2019 – 07/18.09.2019: 0 m³/time - 07/18.09.2019 – 13.01.2020: 45 m³/time - Efter 13.01.2020: 0 m³/time	Pumpning: Fors Dataanalyse: Vandgruppen + KU-studerende	Ingen detekterbar effekt kan ses på rå pejledata - Ifølge modelberegninger vil den fulde effekt af en trykændring i kalken være 1-2 måneder om at nå op til de terrænnære grundvand	/1/ Tabel 1 /2/ /3/



Figur 2. Udstrækningen af Jeppes MIKE SHE model vist med sorte streger på et kort med højdekurver for terrænet. Rørtraceer indlagt i modellen som vandløb eller dræn er vist som henholdsvis blå og orange streger.

(huse, veje), omfangsdræn og andre rørtraceer, som kan tænkes at påvirke det terrænnære grundvandsspejl. Figur 3 viser de rørtraceer, der er indlagt i modellen som drænende vandløb med fastholdt trykniveau svarende til dybden af rørene. I første omgang blev rørtraceerne markeret med blåt indlagt i modellen. I løbet af kalibreringsprocessen blev det klart, at de pejleboringer, som ligger tæt på det rør, der er markeret med orange i Figur 2, systematisk overestimerede grundvandsspejlet i forhold til observationer fra pejlenetværket. Efter at den orange ledningsstreng blev lagt ind i modellen, passede modellen markant bedre med pejledata. Det er et klart tegn på, at rørtraceet på en eller anden måde har en drænende effekt. Det orange rør er strømpeforet og formentlig tæt, så måske sker dræningen via stikledninger fra husene.

Modelsimuleringer og nøjagtighedskriterier kan ses i /2/.

JCR-modellen

Som supplement til JE's model blev der udviklet en simpel vandbalancemodel (JCR-modellen). Modelkonceptet, som er illustreret i Figur 3, er karakteriseret ved følgende:

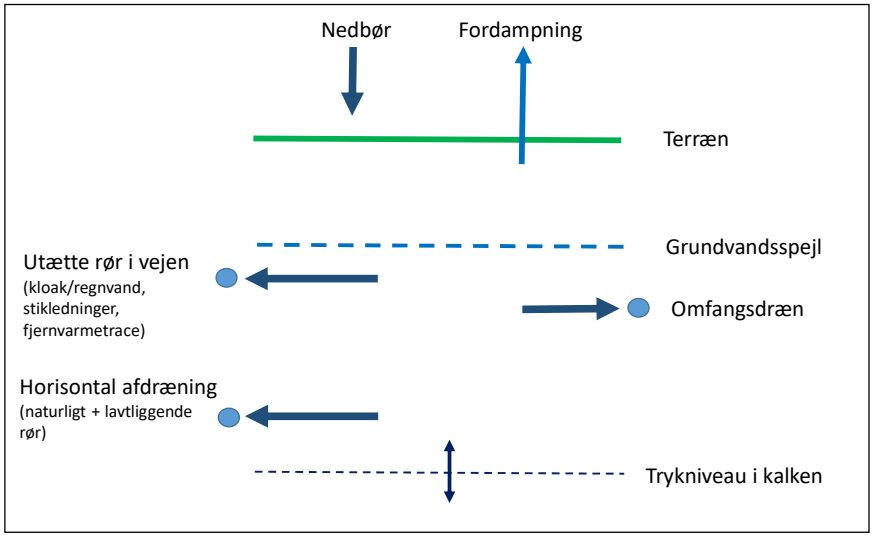
- Modellen består af vandbalanceberegninger baseret på simpelt vand-bogholderi for enkeltboringer. Der er lavet modeller for 34 boringer, hvor der vurderedes at være tilstrækkelige observationer af god kvalitet.
- Modellen opererer med daglige tidsskridt og drives af observerede data fra samme nedbørsstation og potentiel fordampning som JE's model.
- Modellen beregner daglige ændringer i vandindhold i rodzonen, aktuel fordampning, perkolation af vand fra rodzonen til det terrænnære grundvandsspejl (= grundvandsdannelse) og udstrømning fra grundvandszonen til omfangsdræn (ved de huse hvor et sådant findes) samt til et øvre og et nedre horisontalt dræn. Endelig beregnes vandstrømningen mellem det terrænnære grundvand og det dybe kalkmagasin.
- Modellen har 13 parametre som angivet i Tabel 2.
- De tre parametre, der beskriver, hvor hurtigt vandet strømmer horisontalt ($DR_{omf\text{-}dræn}$, $DR_{bund\text{-}dræn}$ og $DR_{top\text{-}dræn}$ i Tabel 2) justeres som funktion af afstand til nærmeste dræn, således at effekten af rørledningsnettets drænende effekt kan beskrives på lokal skala. De tilhørende ligninger er beskrevet i /3/.
- Der laves simuleringer for perioden fra 1.1.2017 til 31.03.2020, idet det første halve år benyttes som "opvarmning", så det ukendte startniveau af vandindhold i rodzonen og grundvandsspejl ingen indflydelse får på resultaterne.
- Modellen er programmeret ved hjælp af programmereringssproget python.

7 af de 13 modelparametre (Tabel 2) er fastsat ud fra data fra de enkelte grunde og varierer derfor fra boring til boring. De resterende 6 modelparametre er bestemt ved kalibrering mod 4 boringer og efterfølgende overført til

Tabel 2. Parametre i JCR modellen.

Parameter	Beskrivelse	Værdi	Bestemmes hvordan
Terrænkote			GPS målinger
Θ_{max}	Maximalt vandindhold i rodzone	180 mm	***Kalibrering***
Θ_{s}	Vandindhold i rodzone ved start af grundvandsdannelse	18 mm	***Kalibrering***
$H_{omf\text{-}dræn}$	Omfangsdræn - dybde		Data fra grundejere
$DR_{omf\text{-}dræn}$	Omfangsdræn - drænkoefficient*	3 mm vand/dag/m grundvandsspejl over $H_{omf\text{-}dræn}$	Målinger fra Valhalvej 50
$H_{bund\text{-}dræn}$	Horisontal dræn bund - dybde	2 m under terræn, bortset fra få steder hvor der er konkrete Fors data fra rørtraceer	
$DR_{bund\text{-}dræn}$	Horisontal dræn bund - drænkoefficient*	0,8% af vandet over drændybde pr dag	***Kalibrering***
$H_{top\text{-}dræn}$	Horisontal dræn top - dybde	1 m over bund-dræn, dog mindst 1 m under terræn	
$DR_{top\text{-}dræn}$	Horisontal dræn top - drænkoefficient*	8% af vandet over drændybde pr dag	***Kalibrering***
x	Afstand fra boring til nærmeste dræn*		Målt på kort
H_{kalk}	Trykniveau i kalken	4,5 m (7,0 m ved lukning af vandværket)	Måledata
K_{v}	Hydraulisk ledningsevne i moræneler over kalken	0,5 mm/dag	***Kalibrering***
S_{y}	Magasintal for terrænnært grundvand	10% (dvs. 1 mm grundvandsdannelse => 10 mm stigning i grundvandsspejl	***Kalibrering***

* Drænkoefficienterne bliver justeret i forhold til afstand fra boring til nærmeste dræn. Tallet her svarer til 5 og 10 m afstand for omfangsgsdræn henholdsvis horisontale dræn



Figur 3. Konceptuel skitse for JCR model

de resterende 30 boringer. Så selvom modellen består af 34 parallelle søjler (en søjle for hver boring) uden horisontal vandudveksling, i modsætning til Jeppes model der eksplicit regner på horisontale vandbevægelser, er der alligevel tale om én model for hele området, som er bundet sammen af de 6 universelle (kalibrerede) parameterværdier.

Modellens nøjagtighed for de 4 boringer, som er benyttet til at estimere parametre (kalibrering), og for de 30 boringer, hvor de samme parameterværdier er anvendt (validering) er resumeret i Tabel 3. Middelfejlen (ME) og kvadratafvigelsesfejlen (RMSE) er beregnet for hver boring for de dage, hvor der er pejleobservationer og efterfølgende midlet over henholdsvis 4 og 30 boringer. Tilsvarende er middelfejl på max grundvandsstand beregnet ud fra de årlige hændelser, hvor der er observeret max grundvandsspejl. Tallene i Tabel 3 viser middelfejl i niveauerne (ME) inden for 10 cm, mens kvadratafvigelsesfejlen (RMSE), som er en indikator for nøjagtigheden på de enkelte pejledage, er af størrelsesorden 20-40 cm. Af størst interesse i forhold til modellens anvendelse er dog, at den simulerede middelfejl på max grundvandsstand er i omegnen af 10 cm, og at simuleringen er lige så nøjagtig for valideringstest som i kalibreringen. Resultaterne fra valideringen kan forventes at repræsentere den nøjagtighed, som modellen vil have for andre lokaliteter i området, herunder for punkter/grunde, hvor der ikke er observationer.

Figur 4 viser eksempler på modelsimuleringer for 4 af de boringer, som ikke var inkluderet i kalibreringen. Figuren viser god overensstemmelse ved nogle boringer og mindre god overensstemmelse ved andre boringer, hvilket er tegn på, at der er lokale faktorer, som ikke er beskrevet i modellen. Resultater fra alle boringer kan ses i /3/.

Scenarier – effekter af lukning af vandværk og af klimaændringer

Begge modeller har været anvendt til at prædiktere effekten af at lukke Haraldsborg Vandværk samt effekten af fremtidige klimaændringer. Der er gennemført simple usikkerhedsanalyser med JCR modellen, ved at variere den mest kritiske modelparameter (den vertikale hydrauliske ledningsevne i moræneleret over kalken K_v).

En lukning af Haraldsborg Vandværk betyder, at den oppumpning på 130.000 m^3/år, der har været i de sidste mange år, helt ophører. Effekten heraf vil i de mest kritiske situationer med maximalt grundvandsspejl med stor sandsynlighed være en øgning af det maksimale grundvandsspejl på 5-10 cm på grunde, hvor der ikke er omfangsdræn. I værste tilfælde (med lille sandsynlighed) kan effekten enkelte steder være op til 15 cm. Grunde med omfangsdræn får en mindre øgning af grundvandsspejlet.

Øget nedbør som følge af klimaændringer vil i 2050 mest sandsynlig betyde en øgning af det maksimale grundvandsspejl på 10-20 cm på grunde, hvor der ikke er omfangsdræn. I værste tilfælde (med lille sandsynlighed) kan effekten blive op til 40 cm. I år 2100 vil effekten være ca. dobbelt så stor. Dvs. at effekten af klimaændringer er markant større end effekten af at lukke Haraldsborg Vandværk.

Hvor usikre er konklusionerne? Alle modeller er simplifikationer af virkeligheden, og modelforudsigelser er mere eller mindre usikre. Vi har benyttet to meget forskellige modeller, nemlig Jeppes model baseret på MIKE SHE modelsystemet, som er state-of-the-art, og en specielt konstrueret model for området (JCR-modellen). På grund af de mange gode data fra lokalområdet, har det været muligt at udvikle begge modeller, så de simulerer pejleobservationerne med en nøjagtighed, der mindst svarer til gængs modelleringspraksis. Normalt vil to forskellige modeller give vidt forskellige resultater, når de benyttes til at forudsige effekter af ændringer i oppumpning eller klima (/5/, /6/). Begge modeller giver i praksis samme forudsigelser. Det taler for, at konklusionerne er robuste.

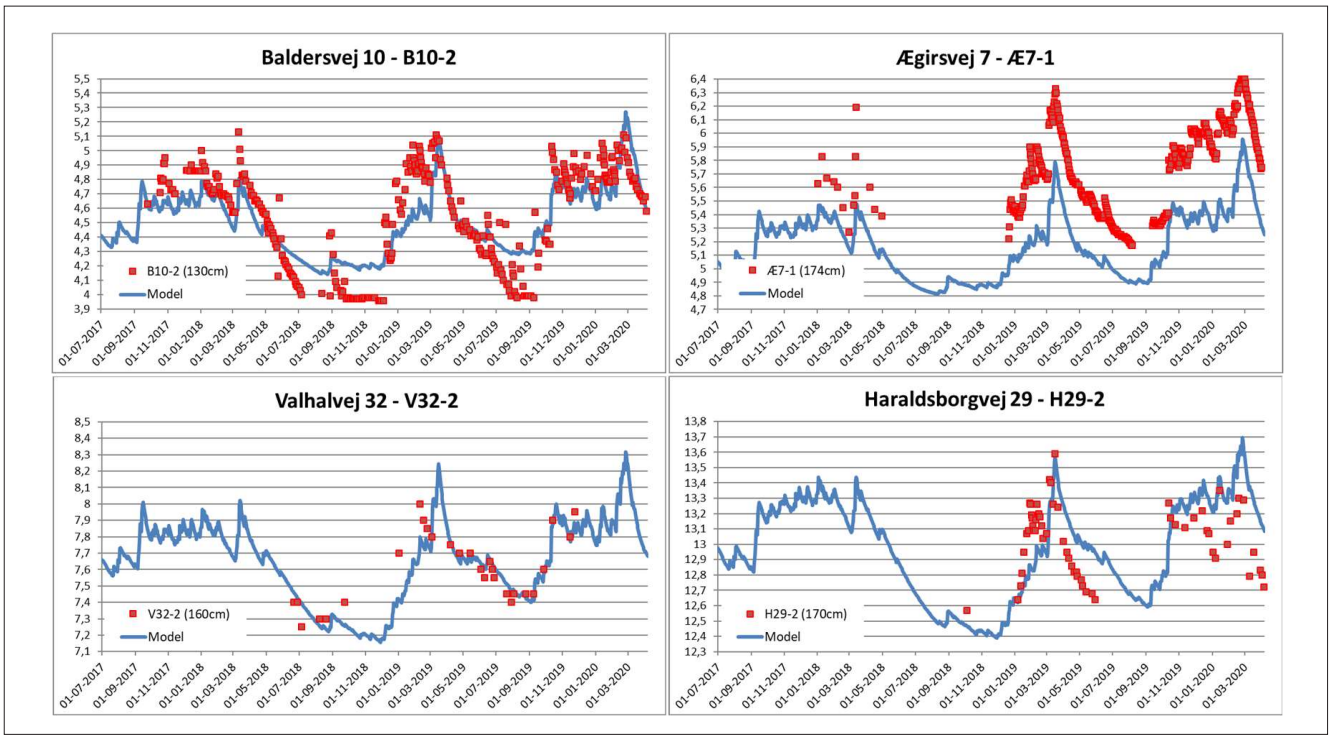
Perspektiver

Der er gennem de seneste 5-10 år gennemført en del undersøgelser af højtliggende grundvandsspejl i byområder. Vores undersøgelse adskiller sig fra de øvrige ved, at pejlenetværket er meget mere fintmasket, ofte med 2-3 boringer på en enkelt grund. Det har gjort det muligt at analysere betydningen af den drænende effekt af rørtraceer med tilhørende stikledninger og omfangsdræn. Vores resultater viser, at den urbane infrastruktur som ledningsnet har en meget stor indflydelse på det terrænnære grundvand lokalt omkring huse.

Vores undersøgelser illustrerer vigtigheden af at have mange gode lokale data. Data fra det borgerdrevne pejlenetværk har været uvurderlige for forståelsen af hydrogeologien, både hos fagfolk og de berørte grundejere (se /1/). De gode data har desuden været en forudsætning for at kunnet opstille to modeller som begge giver gode modelsimuleringer og samme prædiktioner af effekter ved stop for oppumpning og som resultat af klimaændringer.

Tabel 3. Nøjagtigheden af JCR modellen i kalibreringssituationen og ved blindtest mod 30 boringer for perioden 01.07.2017 – 31.03.2020.

Nøjagtighedskriterie	Kalibrering (4 boringer)	Validering (30 boringer)
Middelfejl (ME)	- 7 cm	1 cm
Root Mean Square Error (RMSE)	21 cm	37 cm
Middelfejl på max grundvandsstand	16 cm	6 cm



Figur 4. Modelsimuleringer sammenlignet med pejledata fra fire boringer, som ikke har været benyttet til kalibrering (valideringstest)

Referencer

/1/ Refsgaard, J.C., Berg, O., Ramanujam, P.S., Anthony, H., Jakobsen, H., Madsen, S-A-T., Correll, H., Eriksen J. 2021: Borgerinddragelse i vandforvaltning. Vand & Jord, dette nummer.

/2/ Eriksen, J. 2019: A Field and Model Study of the Effects of closing Haraldsborg Waterworks (Roskilde) on a rising WaterTable and Near-Surface Groundwater. Master Thesis. University of Copenhagen, 118 sider. https://www.fors.dk/wp-content/uploads/2020/07/speciale-jeppe-10.pdf?x29193

/3/ Refsgaard, J.C. 2020: Haraldsborg Vandværk - Grundvandsproblemer. Undersøgelser af effekten af lukning af vandværk go klimaændringer på det terrænnære grundvandsspejl i området omkring Haraldsborg Vandværk, Roskilde. 74 sider. https://www.fors.dk/wp-content/uploads/2020/07/haraldsborg-teknisk-rapport-jens-christian-refsgaard-30juli2020-10.pdf?x29193

/4/ Rambøll 2017: Modelberegninger og vurdering af konsekvenser ved nedlukning af Haraldsborg Vandværk. Notat udarbejdet af Rambøll for Fors 2017.03.03, 3 sider plus 8 bilag.

/5/ Seifert, D., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C., Højberg, A.L., Troldborg, L. 2012: Assessment of hydrological model predictive ability given multiple conceptual geological models. Water Resources Research, WR011149, http://dx.doi.org/10.1029/2011WR011149

/6/ Sonnenborg, T.O., Seifert, D., Refsgaard, J.C. 2015: Climate model uncertainty vs. conceptual geological uncertainty in hydrological modelling. Hydrology and Earth System Sciences, 19, 3891-3901. http://dx.doi.org/10.5194/hess-19-3891-2015

Jens Christian Refsgaard (jcr@geus.dk), professor emeritus i hydrologi, GEUS. Faglig rådgiver for Vandgruppen.

Jeppe Eriksen, hydrogeolog, lavede specialeprojekt som geologistuderende på KU i tilknytning til projektet.

Olaf Berg, P.S. Ramanujam og Henrik Anthony er grundejere og medlem af Vandgruppen.

Henriette Jakobsen, Fagspecialist Vand, Fors A/S.

Steffan Alexander Thule Madsen, Chef Vand & Varme, Fors A/S

Henrik Correl, Produktionsdirektør, Fors A/S