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.

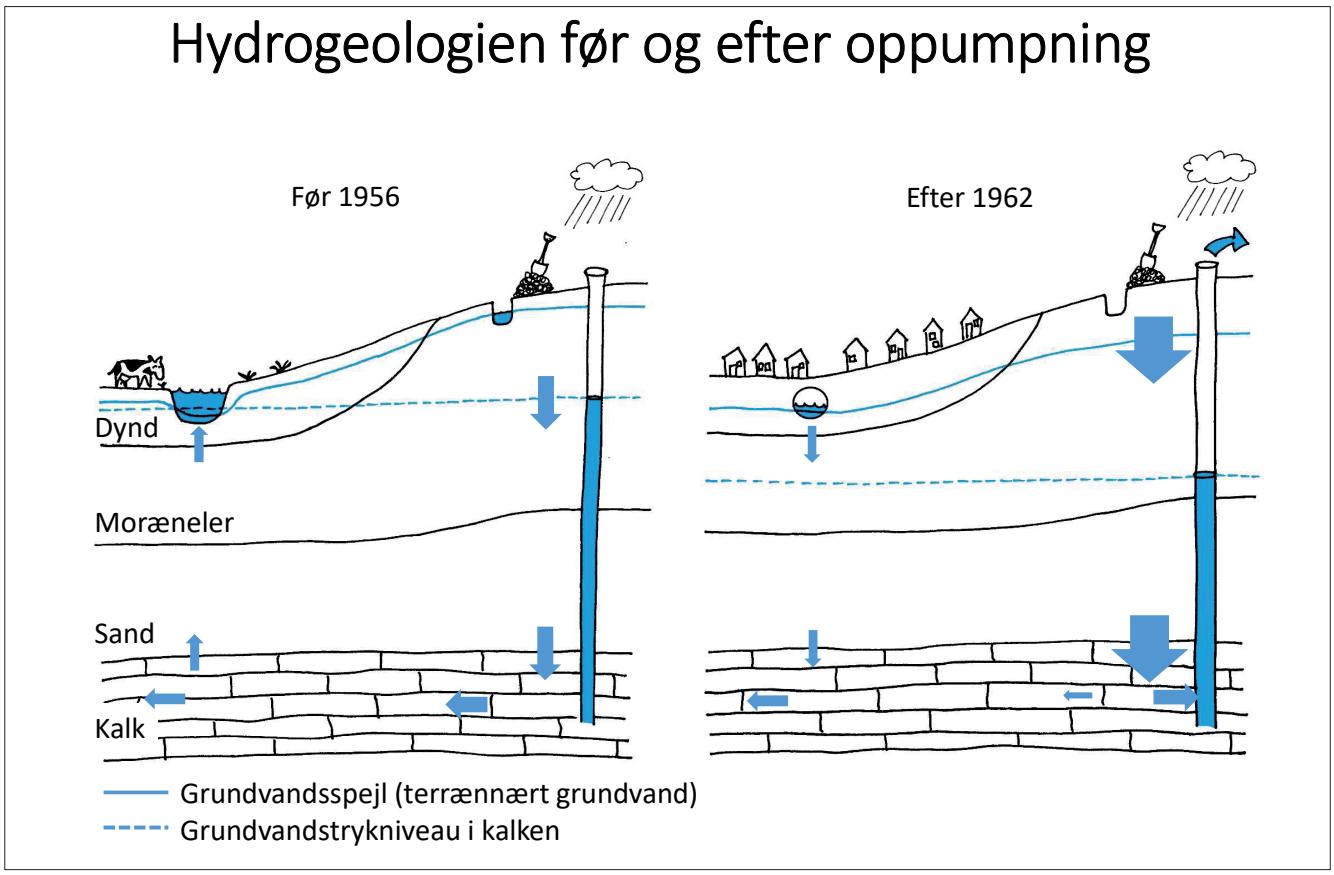
For at opnå bedre forståelse af områdets hydrogeologi og vurdere effekter af lukning af vandværket og klimaændringer blev der opstillet to meget forskellige modeller.

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.

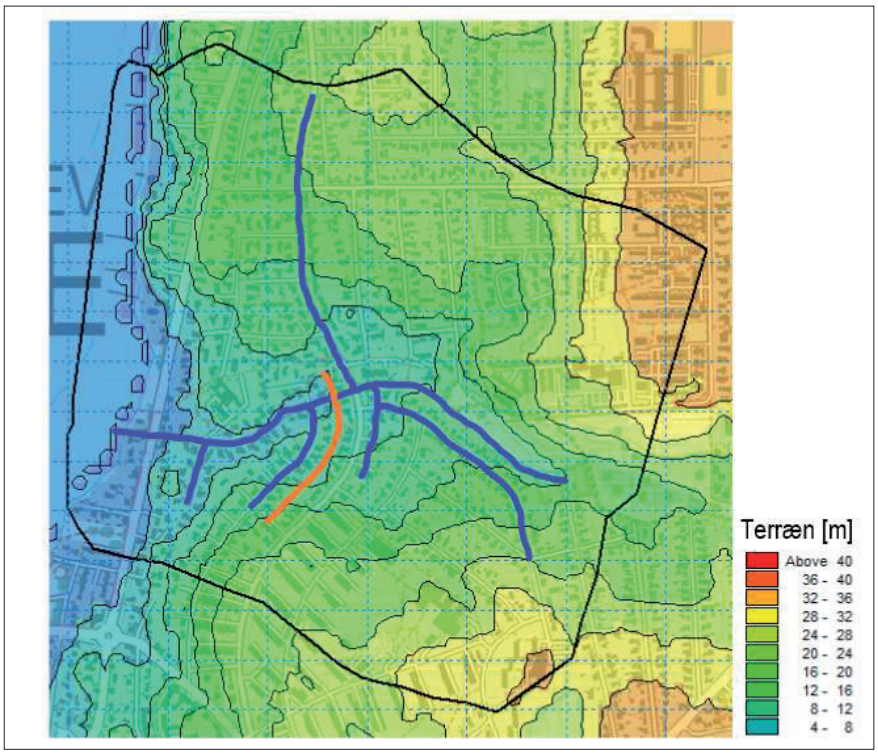
Modellen har indbygget data om befæstning



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 drændingen 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:

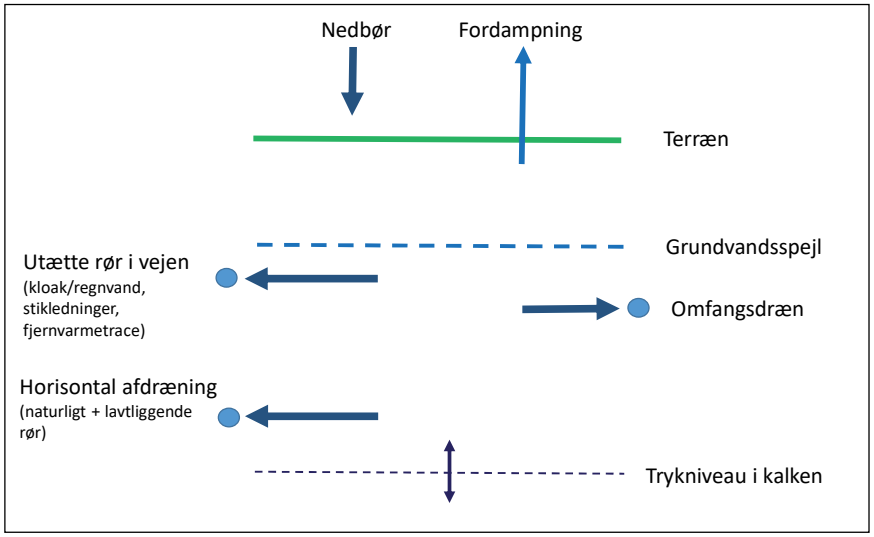
- Modellen består af vandbalanceberegninger baseret på simpelt vand-bogholderi for enkeltboringer. Der er lavet modeller for 34 boringer, hvor der vurderedes at være tilstrækkelige observationer af god kvalitet.
- Modellen opererer med daglige tidsskridt og drives af observerede data fra samme nedbørsstation 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 m³/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.

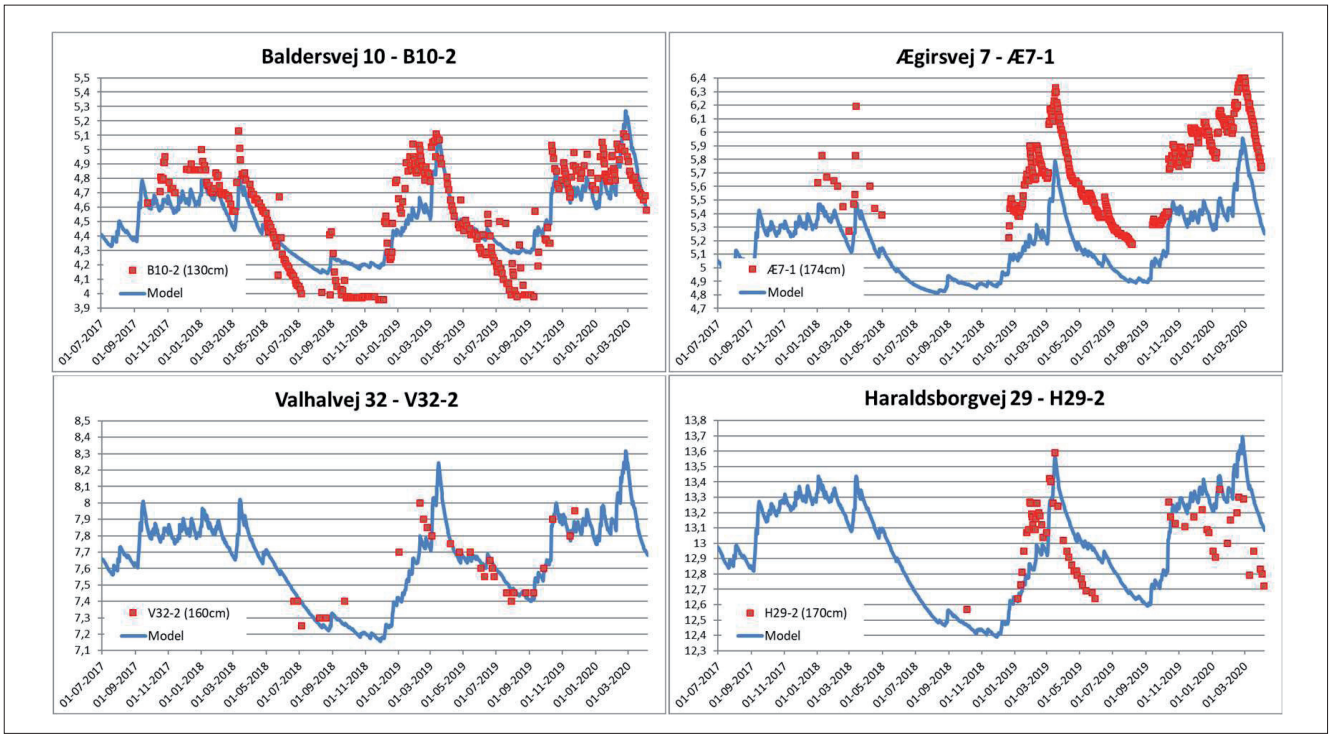
Perspektiver

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