Undersøgelser af effekten af lukning af vandværk og klimaændringer på det terrænnære grundvandsspejl i området omkring Haraldsborg Vandværk, Roskilde

Roskilde, Juli 2020

Jens Christian Refsgaard
Professor emeritus, Rådgiver for Vandgruppen

Indhold

Konklusioner og anbefalinger ... 4
Konklusioner ... 4
Anbefalinger ... 6
1. Baggrund og formål ... 8
1.1 Historik omkring lukning af Haraldsborg Vandværk ... 8
1.2 Fors-Vandgruppe samarbejde 2017 - 2020 ... 9
1.3 Formål og målgruppe ... 9
1.4 Min rolle ... 10
2. Området og tidligere undersøgelser ... 11
2.1 Hydrogeologiske forhold ... 11
2.2 Rambølls undersøgelse ... 13
3. Data indsamlet i projektet ... 14
3.1 Vandgruppens observationer af terrænnært grundvandsspejl ... 14
3.1.1 Pejlenetværket ... 14
3.1.2 Eksempler på pejledata ... 14
3.1.3 Betydning af rørledninger for det terrænnære grundvandsspejl ... 16
3.2 Fors boringer ... 16
3.3 Geofysiske undersøgelser ... 17
3.4 Pumpeforsøget ... 18
3.5 Drænende effekt fra ledningsnet – TV inspektion Ægirsvej ... 18
3.6 Vandmængder fra omfangsdræn ... 19
4. Jeppe Eriksens model ... 20
4.1 Beskrivelse af modellen ... 20
4.2 Kalibreringsresultater og vurdering af modellen ... 22
5. JCR-modellen ... 24
5.1 Beskrivelse af modellen ... 24
5.2 Resultater fra kalibrering, validering og vurdering af modellen ... 28
5.3 Sammenligning af Jeppes model og JCR-modellen – ensemble modellering ... 30
6. Lukning af Haraldsborg Vandværk ... 31
6.1 Analyse af max grundvandsspejl observeret i Vandgruppens pejlenetværk ... 31
6.2 Modelsimuleringer af pumpeeksperimentet ... 32
6.3 Model simuleringer af effekt af stop for oppumpning ... 33

6.3.1 Jeppes model ... 33
6.3.2 Følsomhedsanalyser – usikkerhed på hydraulisk ledningsevne i moræneleret ... 33
6.3.3 JCR-modellen ... 34
7. Klimaændringer ... 35
7.1 Stigning i havniveauet – højere vandstand i Roskilde Fjord ... 35
7.2 Øget nedbør ... 35
8. Referencer ... 37
Bilag A: Vandgruppens pejlinger ... 38
A.1 Netværk af boringer ... 38
A.2 Udførelse af boringerne ... 40
A.3 Observationer ... 41
A.4 Automatisk registrering i boring Æ5-1 ... 41
A.5 Kvalitetssikring af data ... 41
A.6 Plot af data ... 42
Bilag B: Pejledata fra Fors boringer ... 52
Bilag C: Omfangsdræn – data fra Valhalvej 50 ... 54
Bilag D: Formel for justering af drænkoefficienter i JCR model ... 56
Bilag E: Simuleringsresultater med JCR-modellen ... 58
Bilag F: Grundvandsproblemer i haven? ... 72

Konklusioner og anbefalinger

Konklusioner

Projektforløbet

- *Samarbejde mellem Fors og Vandgruppen*. Projektet 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 fase blev der gradvist opbygget et godt tillidsforhold, som resulterede i beslutningen om, at Fors lavede et pumpeeksperiment og bidrog med nogle undersøgelser samtidig med, at grundejerne bidrog med lokale målinger af grundvandsspejl i et omfattende pejlenetværk.

- *Citizen science*. Den aktive inddragelse af en stor gruppe grundejere i etablering og drift af Vandgruppens pejlenetværk (40 boringer fordelt blandt 21 grundejere) har været en forudsætning for at projektet har kunnet gennemføres. Borgerinddragelsen har haft mange positive aspekter:
    - Det ville ikke have været økonomisk realistisk at lave så mange boringer og så stor dataindsamling med efterfølgende databearbejdning og analyse, 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 er almindelig accepteret, at aktiv deltagelse undervejs i en proces giver bedre viden om grundlaget for de opnåede resultater og en større grad af accept af konklusionerne.

  Alt i alt har den aktive borgerinvolvering haft afgørende betydning for projektet – med oplagte gevinster både for Fors og for grundejerne. Det er et eksempel på ”citizen science”, når det er bedst.

- *Studenterprojekt.* Tilknytningen af Jeppe Eriksen som specialestuderende (geologistuderende, Københavns Universitet) til at lave feltarbejde og hydrologisk modellering var en stor gevinst for projektet, fordi det både gav ”muskler” og kompetence til at lave mere omfattende analyser, end det ellers ville have været muligt. Projektet var interessant for en specialestuderende, fordi der var et unikt datasæt fra de mange lokale pejlinger, fordi projektet indeholdt mange discipliner (feltarbejde, dataanalyse og modellering), og fordi den specialestuderende via samarbejde med Vandgruppen og Fors kunne øve sig i rollen som faglig rådgiver i et praktisk projekt af betydning for mange mennesker.

- *Datagrundlag*. I februar 2017, da varslingen af en lukning af Haraldsborg Vandværk blev sendt til grundejerne, fandtes der ingen relevante data om det terrænnære grundvandsspejl i lokalområdet.

Siden da er der lavet en omfattende indsamling af data til vurdering af de hydrogeologiske forhold. Vandgruppens pejlenetværk med regelmæssige pejlinger fra 40 boringer gennem et par år findes ikke tilsvarende andre steder i landet. Dette unikke datasæt har sammen med mere traditionel dataindsamling (seks nye boringer, dataloggere i 8 boringer, borehulslogs, geoelektrik, TV inspektion af rørledninger) og et pumpeeksperiment med variabel oppumpning over tid givet et meget stærkt datagrundlag for de modelbaserede analyser, der er beskrevet i nærværende rapport.

Projektets resultater

- *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. Det var derfor nærliggende at formode, at det var et gennemgående sandlag, måske i form af en sandlinse med udbredelse i hele lokalområdet omkring Haraldsborg Vandværk. Det sandlag ville i givet fald have været nyttig til en afværgeoppumpning, såfremt en sådan skulle være nødvendig, og såfremt vi ville kunne få lov til at lave en sådan. Feltarbejdet i forbindelse med projektet viste, at det sandlag ikke findes, og at de gamle boreprøver/borerapporter derfor formentlig er fejltolkede.

- *Hydrogeologisk forståelse – drænende effekt af rørtraceer*. Der er gennem de seneste 5-10 år gennemført en del undersøgelser af højtliggende grundvandsspejl i byområder, bl.a. i forbindelse med vurderinger af LAR løsninger (Lokal Afledning af Regnvand). 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. Konklusionen herpå er, at alle de menneskeskabte dræn betyder, at det terrænnære grundvandsspejl efter lukning af Haraldsborg Vandværk ligger markant lavere, end det ville gøre i "naturtilstanden" fra før 1960.

- *Lukning af Haraldsborg Vandværk.* 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. Det indebærer, at det terrænnære grundvandsspejl generelt stiger. 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.

- *Klimaændringer.*
  - 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.
  - Havspejlsstigning (højere vandstand i Roskilde Fjord) vil ikke have nogen effekt på det terrænnære grundvandspejl i området øst for Frederiksborgvej.

- *Hvor usikre er konklusionerne?* Alle modeller er simplifikationer af virkeligheden, og modelforudsigelser er mere eller mindre usikre. I projektet har vi benyttet to meget forskellige modeller, nemlig Jeppes model baseret på MIKE SHE modelsystemet, som mange rådgivere, inkl.

Rambøll, benytter, og en specielt konstrueret model for området (JCR modellen). Fordi modellerne har kunnet benytte de mange gode data fra lokalområdet, har det været muligt at udvikle begge modeller, så de kan simulere pejlobservationerne med en nøjagtighed, der svarer til, eller er bedre end, gængs modelleringspraksis i den danske vandbranche. Normalt vil to forskellige modeller give vidt forskellige resultater, når de benyttes til at forudsige effekter af ændringer i oppumpning eller klima (Seifert et al., 2012, Sonnenborg et al., 2015). Vores to modeller giver i praksis samme forudsigelser. Det betyder, at konklusionerne anses for at være robuste.

Anbefalinger

Til grundejere

- *Fokuser på klimaændringer*. Mens effekten af at lukke Haraldsborg Vandværk er ganske lille, vil effekten af klimaændringer kunne udgøre en betydelig trussel for mange grundejere. Klimaændringerne er allerede i gang, eksemplificeret ved de ekstremt våde vintermåneder i marts 2019 og februar 2020. De effekter, vi forudsiger i rapporten, skyldes den yderligere stigning i nedbør, som kan forventes i de kommende årtier. Grundejerne bør derfor rette fokus på klimaændringers betydning for øget grundvandsstand.

- *Individuelle løsninger*. Området omkring Haraldsborg Vandværk er et sted, hvor det terrænnære grundvandsspejl generelt ligger højt. En del grundejere kan derfor risikere fortsatte eller nye problemer med for højt grundvand i de kommende år. Grundejerne bør derfor undersøge, hvor stort det potentielle problem er. Regelmæssige grundvandspejlinger et par steder på grunden nogle sæsoner i de mest nedbørstunge måneder (stærkt varierende) vil kunne hjælpe i en sådan vurdering. Den ultimative individuelle sikring kan være omfangsdræn (nogle steder suppleret med indskudsdræn), men det er dyrt og vil ikke være nødvendigt for alle. *[Se Bilag F]*

- *Kollektive løsninger*. Den mest effektive kollektive løsning på højtliggende grundvand i området vil være overfladenære dræn. Som det også overvejes andre steder i landet, kunne det ske ved at tilføje en egentlig drænledning i de rørtraceer, hvor der i forvejen er kloak og regnvandsledninger. Det vil i givet fald kræve en lovændring, der fx gør det muligt for vandselskaber at etablere sådanne ledninger. Grundejerne bør samarbejde med Roskilde Kommune om at få etableret en langsigtet klimatilpasning af området.

Til Fors

- *Borgerinddragelse.* Den sædvanlige praksis med at sende et 6-måneders varsel og så indkalde til et borgermøde for at informere om en beslutning, der allerede er taget, er juridisk efter reglerne. Men hvis borgerne har bekymringer om beslutningen, er det ikke en anstændig behandling af borgere og kunder, og det kan derfor give anledning til forskellige former for utilfredshed, som ikke er i nogens interesse. Vores projektforløb viser, at en aktiv inddragelse af borgere kan blive en stor gevinst med hensyn til at få tvivl om beslutningsgrundlag belyst, og at dialog og samarbejde kan opbygge den gensidige tillid og forhindre/forebygge unødvendige konflikter. En sådan borgerinddragelse bør ske så tidligt i processen som muligt – på et tidspunkt, hvor ikke alle beslutninger er truffet.

Til Roskilde Kommune

- *Klimatilpasning i området.* Store dele af Haraldsborg området har i dag en ekstraordinær høj grundvandsstand, som fremover øges betydeligt som følge af klimaændringer. Roskilde Kommune bør derfor prioritere området med hensyn til klimasikringsinitiativer i forhold til høj grundvandsstand.
- *Udnyt data og erfaring fra Haraldsborg området.* Roskilde Kommune bør overveje, om de indsamlede data og den viden, der er blevet frembragt i projektet kan nyttigøres i kommunens arbejde med klimatilpasning.

1. Baggrund og formål

1.1 Historik omkring lukning af Haraldsborg Vandværk

Haraldsborg Vandværks indvindingsopland er et tidligere mose og engdrag med naturlig grundvandsstand i eller meget tæt på terrænniveau. Området blev langt overvejende bebygget fra 1962, hvor vandværket blev taget i brug. Vandindvindingen medførte betydelige sænkninger af grundvandsstanden.

Af vandforsyningsplanen 2002-12 fremgik det, at Haraldsborg Vandværk skulle nedlægges ved udgangen af 2005. Det blev 550 grundejere orienteret om i januar 2005. Af en supplerende orientering i april samme år fremgik det at:

- *grundvandsniveauet vil vende tilbage til sit naturlige niveau, fra før værket blev taget i brug,*
- *det ændrede grundvandsniveau kan få betydning for ejendomme med kælder og uden omfangsdræn, og*
- *grundvandsniveauet i værste tilfælde kan komme i niveau med terræn.*

Efter borgerprotest besluttede Teknik- og Miljøudvalget i juni 2005 at fortsætte oppumpningen til efter kommunesammenlægningen og revisionen af vandforsyningsplanen. 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 efter forudgående dialog med grundejerne.

Myndighederne noterer et par år senere om Haraldsborg Kildeplads: "*Grundet risiko for oversvømmelse af bebygget område skal der ikke udføres lukning af indvinding*"[1]. Herefter hører grundejerne ikke noget til sagen, før Fors i februar 2017 i et brev til 165 grundejere varsler lukning af vandværket pr. 1. september 2017.

I Fors' brev med den varslede lukning fremgår det, at Rambøll ud fra modelberegninger vurderer, at grundvandsniveauet i gennemsnit maksimalt vil stige med ca. 30 cm, og at det i værste tilfælde kan få betydning for enkelte ejendomme med kældre og uden omfangsdræn. I samme brev redegør Fors 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 Jens Christian Refsgaard (professor i grundvandsressourcer på GEUS) som faglig bisidder. Vandgruppens (Jens Christian Refsgaards) vurdering var, at Rambøll's model ikke er brugbar til en beregning af effekten på det lokale grundvandsstand, og at skønnet på 30 cm stigning er ekstremt usikkert. Efter et velbesøgt og stormfuldt informationsmøde hos Fors i marts 2017 og efterfølgende dialog medgav Fors, at det faglige grundlag (Rambøll's modelberegninger) ikke kunne anses som tilstrækkeligt til at vurdere effekterne, hverken med hensyn til stigning i grundvandstand eller afgrænsning af området, der vil blive påvirket.

Uanset at lukningen af Haraldsborg Vandværk er varslet og kan gennemføres 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 2) der var ingen anvisninger på løsninger på evt. problemer. 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 selv at løse det.

[1] Forslag til Vandplan 2010-2015 for hovedopland 2.2 Isefjord og Roskilde Fjord, side 9

1.2 Fors-Vandgruppe samarbejde 2017 - 2020

På informationsmødet i marts 2017 tilbød Fors, at grundejerne kunne overtage de to resterende boringer, så de kunne danne et pumpelag og lave afværgeoppumpning. En sådan kollektiv løsning ville være markant billigere end individuelle løsninger med omfangsdræn[2], som Roskilde Kommunes Forvaltning anviste som løsning. Efterfølgende viste det sig, at afværgeoppumpning fra de eksisterende boringer ikke kan tillades efter gældende lovgivning.

Efter flere møder mellem Vandgruppen og Fors, hvor Roskilde Kommunes Forvaltning deltog i de første tre møder, blev der i november 2017 enighed om at gennemføre en undersøgelse med følgende hovedelementer:

- Fors' afværgeoppumpning fortsætter indtil august 2021. Oppumpningen varieres i den periode mellem den hidtidige oppumpning (130.000 m^3/år), maximalt mulig oppumpning (400.000 m^3/år og ingen oppumpning.
- Grundejerne etablerer ca. 40 observationsboringer fordelt på ca. 20 grundejere og måler løbende grundvandsstand.
- Fors undersøger 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 (Eriksen, 2019).

Formålet med pumpeeksperimentet var via en kombination af målinger og modelberegninger at vurdere, hvilken effekt ændret oppumpning har på det terrænnære grundvandsspejl omkring folks huse.

Gennemførelse af dette undersøgelsesprojekt forudsatte tilladelse fra Roskilde Kommune til fortsat at udlede oppumpet grundvand fra Haraldsborg Vandværk via regnvandsledning til Roskilde Fjord. Kommunens Klima og Miljøudvalg (KMU) godkendte dette på sit møde den 10. april 2018, idet projektperioden uden forudgående dialog med projektgruppen blev afkortet med et år, således at undersøgelsen forudsættes færdiggjort i august 2020.

1.3 Formål og målgruppe

Formålene med rapporten er

- at give en teknisk afrapportering af de undersøgelser der er gennemført af grundejere, Vandgruppen, Fors og specialeprojektet (Jeppe Eriksen) i perioden 2017 – 2020,
- at sammenfatte resultater og konklusioner fra undersøgelserne, og
- at udarbejde anbefalinger til grundejere, Fors og Roskilde Kommune.

Målgruppen for rapporten er i første omgang Fors, Roskilde Kommune og interesserede grundejere i området, der ønsker teknisk dokumentation for de beslutninger, der skal træffes på baggrund af undersøgelsen. Projektet giver efter min opfattelse ny viden omkring, hvad der er bestemmende for terrænnært grundvand i byområder, og hvordan borgere med fordel kan inddrages i beslutningsprocessen. Derfor er det mit håb, at fagfolk og interesserede borgergrupper andre steder i landet kan have glæde af rapporten.

[2] Afværgeoppumpning kan driftes for ca 50.000 kr/år (fordelt på 150-300 grundejere), mens omfangsdræn koster 250.000 – 500.000 kr per hus alene i etableringsomkostninger

Rapporten er omfattende og indeholder en del faglig terminologi og mange detaljer, som ikke alle er umiddelbart letforståelige. Resumeet med konklusioner og anbefalinger forrest i rapporten forsøger at give et overblik over de væsentligste resultater og konklusioner på et, forhåbentligt, lettere forståeligt sprog.

1.4 Min rolle

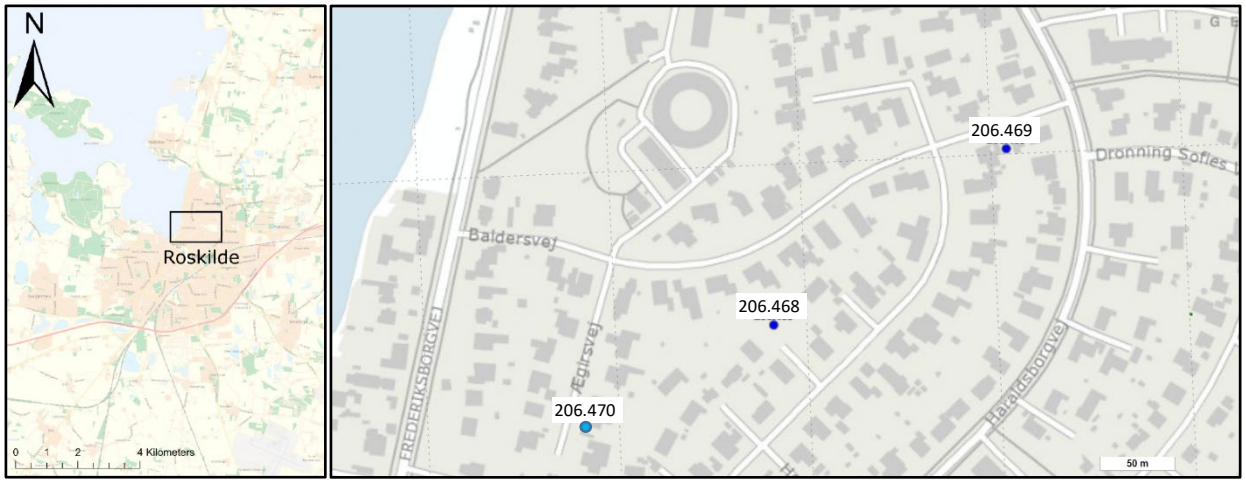
Mine bevæggrunde og baggrund for at engagere mig i dette projekt har været:

- Min datter og svigersøn bor i området, og jeg har derfor en personlig interesse i, at grundejernes interesser bliver tilgodeset. Jeg blev derfor tilknyttet Vandgruppen som faglig rådgiver. Jeg bor selv på Strandgårdsvej ca. 800 m nord for Haraldsborg Vandværk.
- Jeg har en faglig baggrund som professor (emeritus siden 2019) i vandressourcer på GEUS og har i 45 år beskæftiget mig med grundvandsforhold og grundvandsmodeller. GEUS rollen har jeg benyttet til vejledningen af specialeprojektet (Jeppe Eriksen) og til den opgave, GEUS gennemførte for Fors som støtte til specialeprojektet med udførelse af borearbejde i efteråret 2018. Resultaterne af min GEUS indsats kan ses af Jeppe Eriksens specialerapport (Eriksen, 2019). Nærværende rapport er ikke en GEUS rapport, men en rapport udarbejdet af mig som privat rådgiver for Vandgruppen.
- Jeg har siden januar 2018 været medlem af Fors' bestyrelse – valgt af kunderne (= forbrugerne). Mens sagen om lukningen af Haraldsborg Vandværk var en medvirkende årsag til, at jeg stillede op til valget af kunderepræsentanter i Fors' bestyrelse i efteråret 2017, har sagen om Haraldsborg Vandværk ikke været behandlet i bestyrelsen i min valgperiode.

2. Området og tidligere undersøgelser

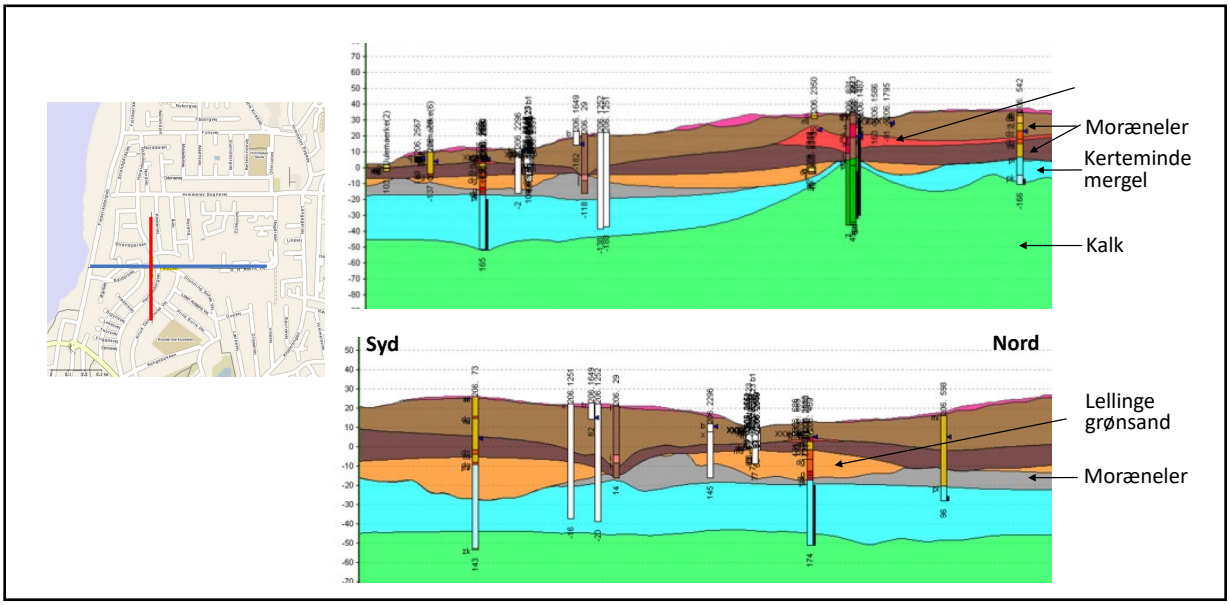
2.1 Hydrogeologiske forhold

Haraldsborg Vandværk blev etableret omkring 1960 i et område, der dengang var i udkanten af Roskilde by. Placeringen af vandværket med de tre indvindingsboringer er vist på Figur 1. Indtil august 2016 var vandindvindingstilladelsen på 600.000 m^3/år. Siden 400.000 m^3/år med forventet tilbagekaldelse 19. august 2020. Oppumpningen var i mange år fordelt på tre boringer 206.468, 206.469 og 206.470. Siden 1993 har oppumpningen været mindre end 400.000 m^3/år og siden 2010 mindre end 200.000 m^3/år. Boring 206.470 på Ægirsvej blev sløjfet i 2016. Vandværket ligger på samme grund som boring 206.468.



Figur 1. Placeringen af området omkring Haraldsborg Vandværk i Roskilde [til venstre, figur fra Eriksen (2019)] og de tre tilknyttede vandværksboringer [til højre, figur fra den nationale boringsdatabase Jupiter].

Geologien i området er illustreret i Figur 2. Vandindvindingen foregår fra kalklaget i ca. m 50 m dybde. Kalken er overlejret af Kertemindemergel, med en overliggende kvartær lagpakke bestående primært af moræneler og (nogle steder) tynde sandlag.

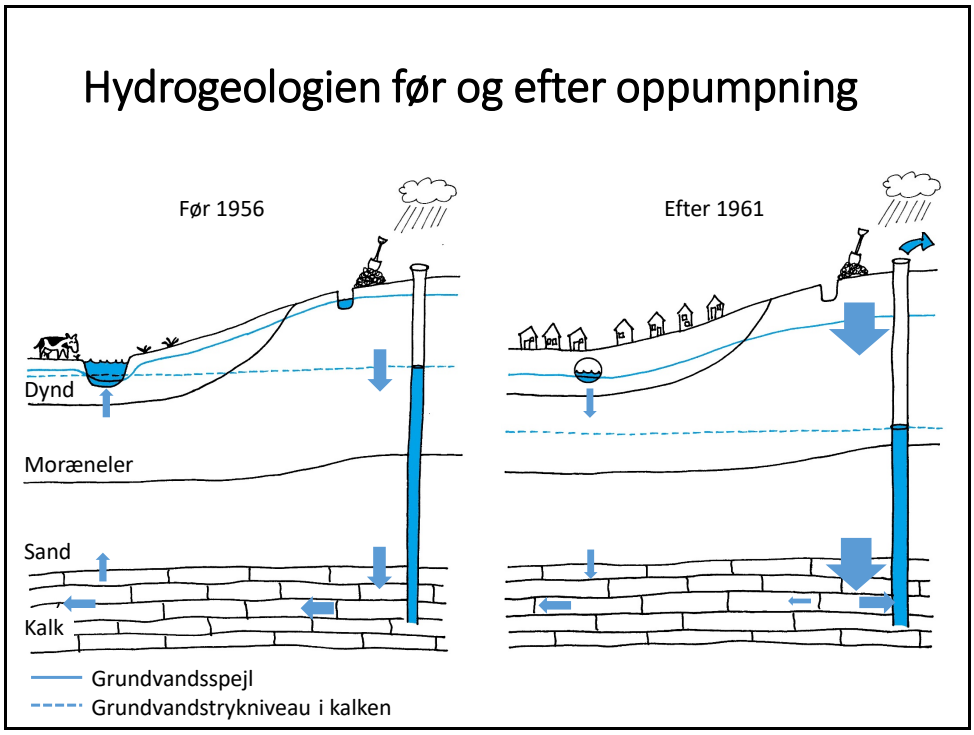


Figur 2. Geologien illustreret med to profiler baseret på Jeppe Eriksens geologiske model (Eriksen (2019).

Figur 3 viser en konceptuel opfattelse af nogle af de forhold, der er bestemmende for vandstrømningerne i området. Kalklagene i ca. 50 m dybde udgør et sammenhængende regionalt (udstrækning > 10 km) grundvandsmagasin med stor hydraulisk ledningsevne (dvs. vandet kan strømme hurtigt). De overliggende sandlag kan også have stor ledningsevne, men sandlagene har, som det fremgår af Figur 2, kun lokal udbredelse. De øvrige lag (moræneler, dynd mv.) har alle en betydelig dårligere evne til at transportere vand.

Det er væsentligt at skelne imellem grundvandstrykniveauet i kalken og det terrænnære grundvandsspejl. Hvis man måler vandstanden i en boring, der når ned i kalken (som fx de tre boringer, der er vist på Figur 1.), vil vandstanden være højere end overkanten af kalklaget. Dvs. at vandet i kalken står under tryk, og vandstanden i borerøret benævnes derfor for grundvandstrykniveauet i kalken. Hvis man derimod graver et tilstrækkeligt dybt hul i haven, vil der på et tidspunkt stå vand i hullet. Det er det terrænnære grundvandspejl, og det er det, der observeres i grundejernes pejlenetværk.

Figuren til venstre illustrerer de naturlige forhold i perioden, før området blev bebygget, og før vandindvindingen startede. Grundvandstrykniveauet i kalken er nogenlunde konstant i området, mens det terrænnære grundvandsspejl i et vist omfang følger terrænet. I de højtliggende områder vil det terrænnære grundvandsspejl ligge over grundvandstrykniveauet i kalken, og der vil i det område ske en grundvandsdannelse til kalken. Omvendt vil det terrænnære grundvandsspejl være lavere end trykniveauet i kalken i de lavtliggende området, hvor der derfor vil være opadrettet strømning i moræneleret fra kalken mod terræn. Figuren til højre illustrerer de ændrede forhold med oppumpning og bymæssig bebyggelse. Her vil grundvandstrykniveauet i kalken være sænket nogle meter, og der vil overalt være nedadrettet strømning i moræneleret, dvs. at kalkmagasinet fungerer som dræn for det terrænnære grundvandvand.



Figur 3. Konceptuel opfattelse af områdets hydrogeologi med vandets strømningsveje før og efter etableringen af vandværket omkring 1960 (tegning: Julie Lawaetz Halleskov).

Mens Figur 3 illustrerer nogle af de væsentligste mekanismer, der styrer vandstrømningerne i området, er det vigtigt at pointere, at figuren er kvalitativ og en forsimpling af forholdene. Tykkelserne af pilene er ikke retvisende for størrelserne af de forskellige strømninger, og et vigtigt element som variationerne henover året er ikke medtaget.

Et spørgsmål, som på forhånd var uklart, var, hvordan den bymæssige infrastruktur (befæstede arealer og rørtraceer) påvirker grundvandsspejlets beliggenhed. Hvis det ingen betydning har vil en lukning af Haraldsborg Vandværk betyde, at grundvandsspejlet kommer tilbage til terræn, som det var før 1960. Men måske har rørtraceerne en drænende effekt der sænker grundvandspejlet (?)

2.2 Rambølls undersøgelse

Det faglige grundlag for Fors' varsling af grundejerne i foråret 2017 var nogle modelberegninger gennemført af Rambøll (Rambøll, 2017). Den grundvandsmodel, som Rambøll benyttede, var baseret på en hydrologisk model for Lejre Vest, Osted og Roskilde opstillet i forbindelse med den statslige grundvandskortlægning (Naturstyrelsen, 2016). Den model blev efterfølgende revideret og anvendt til at vurdere indvindingstilladelser for Roskilde Kommune (Rambøll, 2016). Modelberegningerne i 2017 blev gennemført med modellen for Roskilde Kommune ved at lave beregninger med den hidtidige oppumpning (130.000 m^3/år) og med ingen oppumpning, hvorefter effekten af at lukke for oppumpning blev vurderet som forskellen mellem de to beregninger.

Rambølls model er en traditionel 100 m MIKE SHE baseret model udviklet i forbindelse med den statslige grundvandskortlægning. Her blev den udviklet med det formål at bestemme indvindingsoplande for de kildepladser, hvorfra der oppumpes vand til vandindvinding. Efterfølgende blev den benyttet til at vurdere vandindvindingsmuligheder for boringer i kalken. Til de formål er modellen testet mod et solidt datagrundlag, veldokumenteret og velegnet.

Modellen er derimod ikke udviklet eller testet at være gyldig til at forudsige effekterne af ændret oppumpning fra kalken på det terrænnære grundvandsspejl, som den blev anvendt til forud for varslingen i 2017 (Rambøll, 2017). Af flere forskellige grunde er Rambølls model ikke velegnet til det formål:

- Modellens beskrivelse af det terrænnære grundvandspejl er yderst mangelfuld. I Rambølls rapport forudsættes i stedet, at det terrænnære grundvandsspejl kan repræsenteres af et sandlag (benævnt 'Sand 2'), som ikke findes i lokalområdet.
- Der er ingen data fra lokalområdet vedrørende terrænnært grundvand. Der er kun meget få observationer fra det terrænnære sandlag, og de nærmeste to observationsboringer ligger 5-10 km væk. Modellen er således ikke kalibreret eller testet til at kunne simulere trykniveauforhold i det terrænnære sandlag.
- Modellen har ikke indbygget effekt af urbanisering i form af lokale dræn til Fors' rør, stikledninger eller omfangsdræn.
- Modellen har en opløsning på 100 m og kan derfor kun give en relativ dårlig beskrive de lokale variationer i topografi.

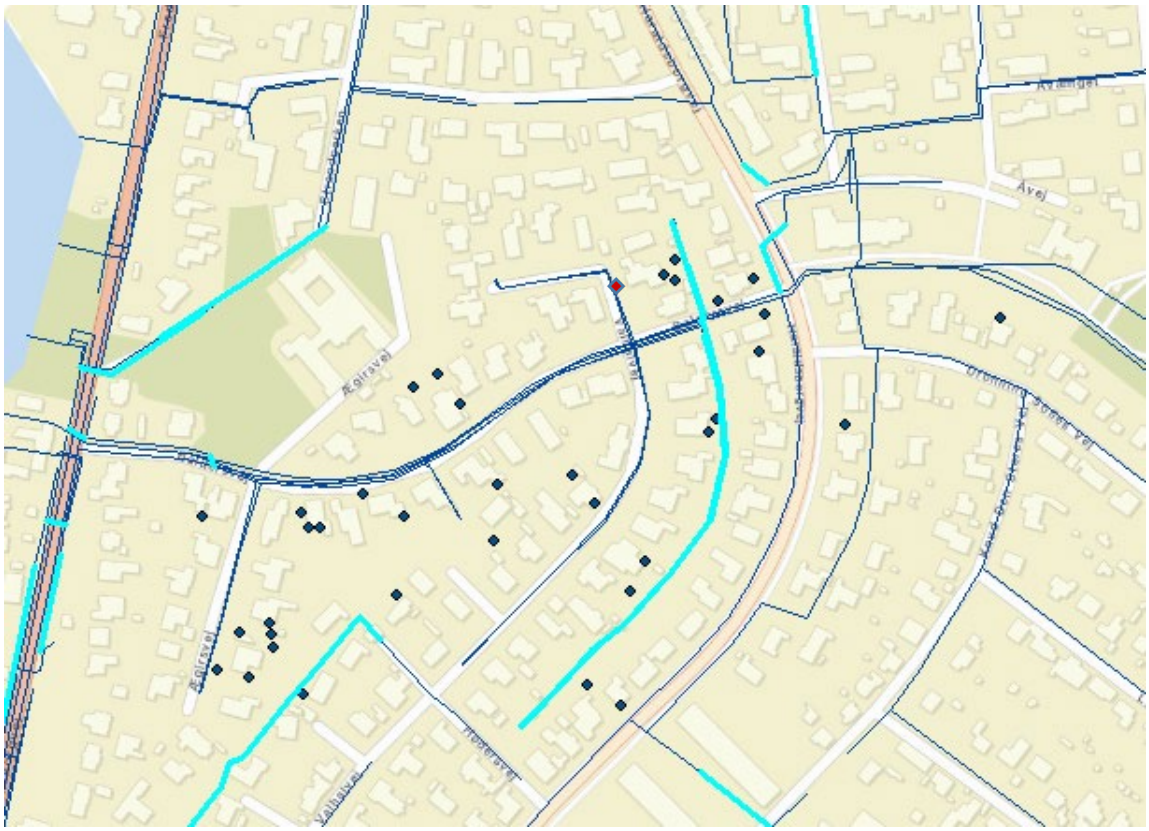
Konklusionen fra Rambølls modelberegninger var, at effekten af en lukning af Haraldsborg Vandværk ville være en stigning i det terrænnære grundvandsspejl på maksimalt 30 cm. På grund af ovennævnte svagheder var den konklusion efter min vurdering yderst usikker og helt utilstrækkeligt som beslutningsgrundlag.

3. Data indsamlet i projektet

3.1 Vandgruppens observationer af terrænnært grundvandsspejl

3.1.1 Pejlenetværket

Vandgruppen har pejlet grundvandsstand i 40 boringer fordelt på 20 grundejere. Boringernes placering er vist på Figur 4.

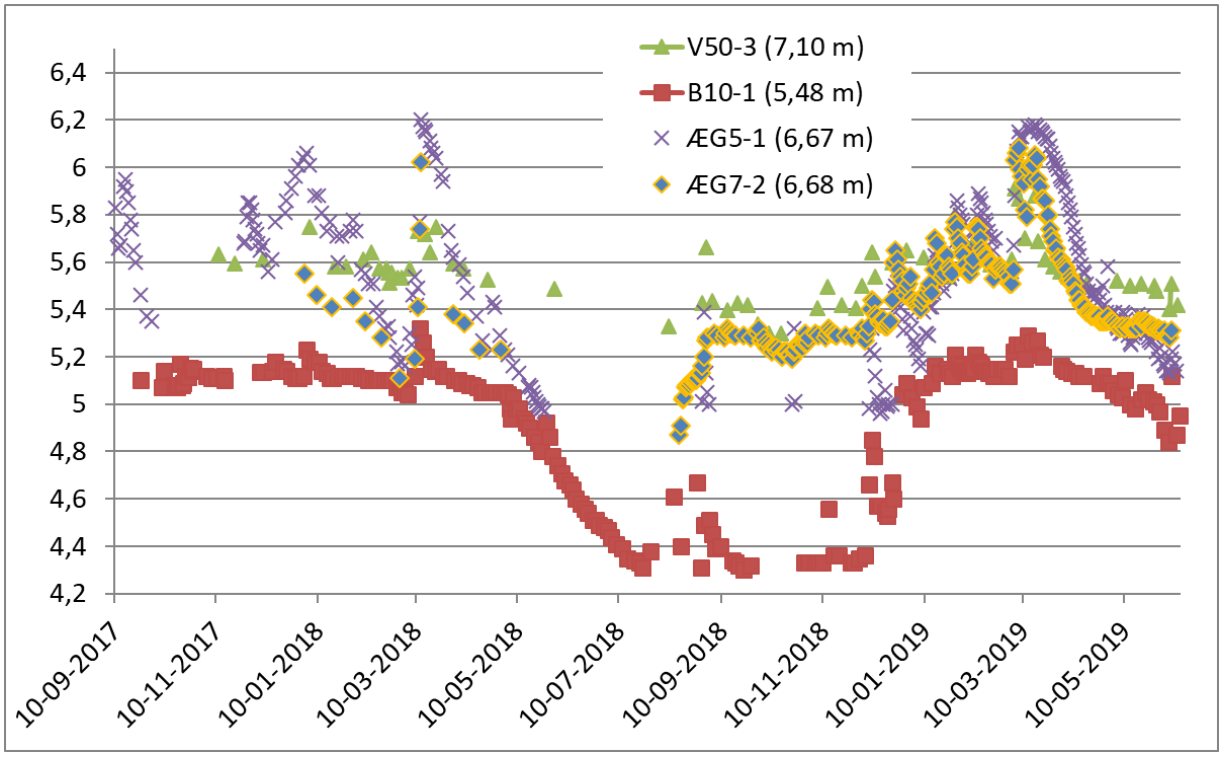


Figur 4. Placering af 37 af de 40 pejleboringer. De blå streger viser placering af Fors' spildevands- og regnvandsledninger. Boringen på Baldersvej 26 er ikke indmålt. De to sidste boringer er placeret på Strandgårdsvej 44, 600 m nord for kortets øverste rand, og fungerer som referenceboringer, idet de ligger udenfor det område, der påvirkes af oppumpningen fra Haraldsborg Vandværk.

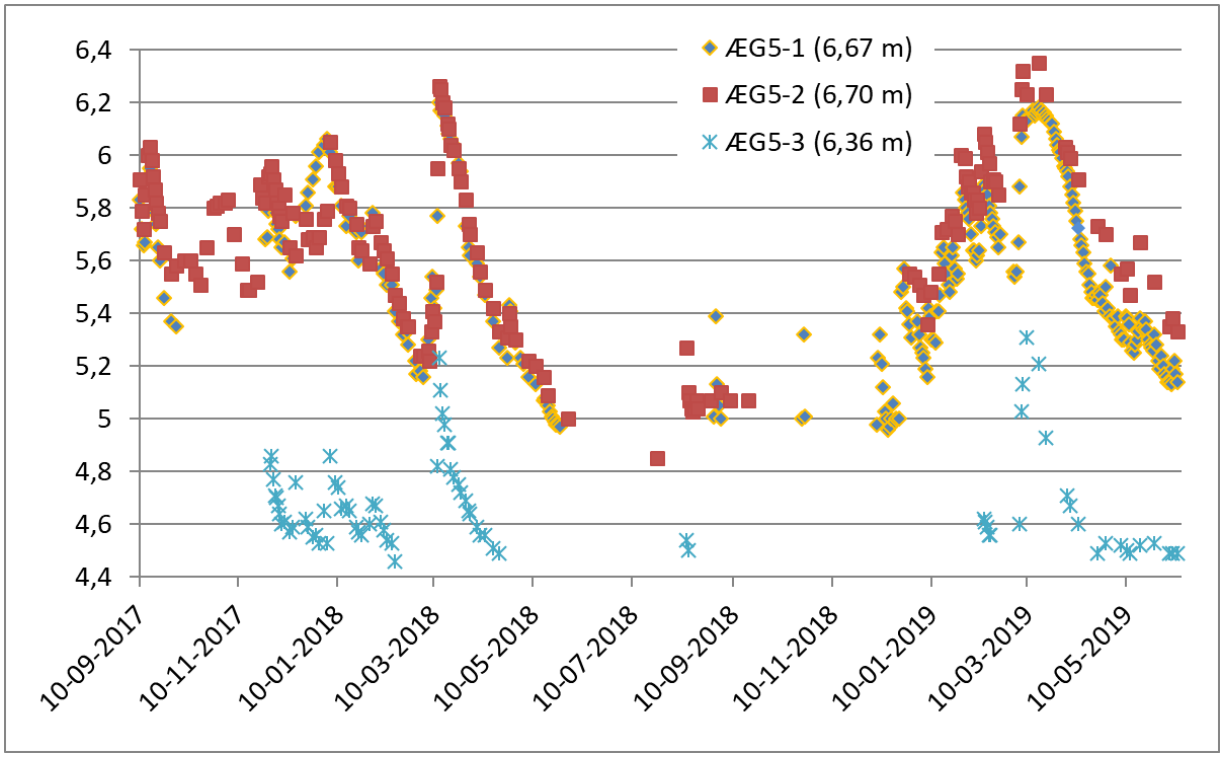
Yderligere informationer om boringerne, dataindsamling og –behandling samt plot af alle observationsdata fremgår af Bilag A.

3.1.2 Eksempler på pejledata

Data er illustreret i Figur 5 og Figur 6, der viser pejlinger fra henholdsvis fire forskellige grunde og fra tre boringer på en enkelt grund. Af figurerne ses, at grundvandsspejlet viser meget af den samme dynamik (variationer over tid) i alle boringer, hvilket er naturligt, fordi variationerne over tid er styret af klimaet med tørre somre og våde vintre. Men figurerne viser også, at der er betydelige forskelle. Figur 5 viser således, at B10-1 ikke varierer lige så meget som Æ5-1 og Æ7-2 i vinterperioder, hvilket skyldes, at grundvandet i B10-1 er meget tæt på terræn og derfor ikke kan blive meget højere. Figuren viser også, at V50-3 har meget mindre fluktuationer end de øvrige boringer, hvilket skyldes, at omfangsdræn på den grund holder grundvandsstanden nogenlunde i ro. Figur 6 viser, at der kan være store forskelle i grundvandsstand med ganske få meters afstand på den samme grund.



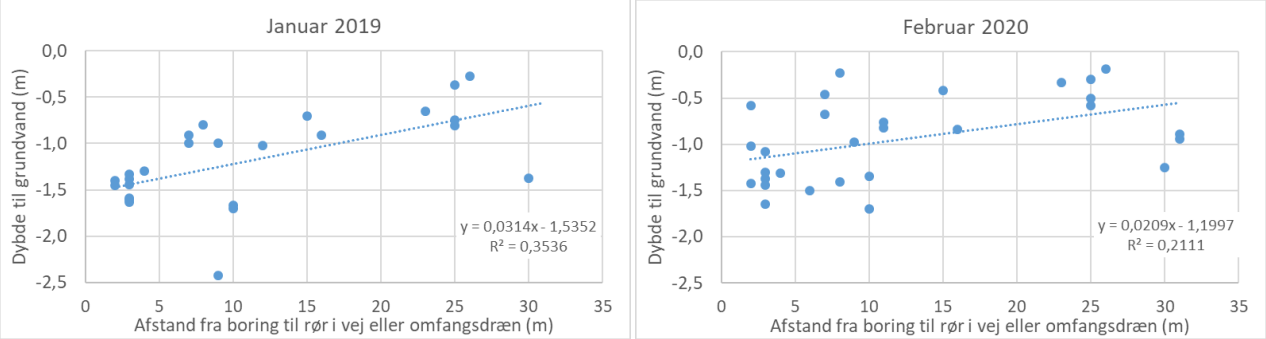
Figur 5. Eksempel på data fra fire forskellige grunde for en periode på 1½ år. Tallene i parentes angiver terrænkoterne.



Figur 6. Eksempel på data for tre boringer på den samme grund for en periode på 1½ år. Tallene i parentes angiver terrænkoterne.

3.1.3 Betydning af rørledninger for det terrænnære grundvandsspejl

For at undersøge hvorvidt rørledninger i vej og omkring huse kan påvirke grundvandsstanden i området, er forholdet mellem grundvandsstand og afstand fra boring til nærmeste rør plottet for forskellige tidspunkter. Figur 7 viser data fra januar 2019 og februar 2020. Her ses, at boringer med mindre end 5 m afstand til rør typisk har grundvandsspejl 1 – 1½ m under terræn, mens boringer med længere end 15 m til rør typisk har et grundvandsspejl, der ligger ½-1 m højere. Selvom der er meget spredning på punkterne og sammenhængen langt fra er perfekt, er tendenslinjens hældning statistisk signifikant. Den relativt lave korrelation (perfekt svarer til R^2=1) viser, at der er andre vigtige lokale faktorer med indflydelse på grundvandsspejlet, og/eller at datagrundlaget med hensyn til placering af stikledninger, som formentlig (se afsnit 3.5) er de mest utætte/drænende, er utilstrækkeligt.



Figur 7. Dybde til det terrænnære grundvand som funktion af afstand fra boring til rør i vej eller omfangsdræn for den maksimale grundvandsstand i januar 2019 og februar 2020. Hvert punkt repræsenterer en boring.

Betydningen heraf er, at de rørledninger, som ligger i vejen og/eller på grundene, ser ud til at have en drænende effekt og således er med til at sænke grundvandsspejlet. Dvs. at det terrænnære grundvandsspejl ligger lavere i dag, end det ville gøre i en naturlig situation, fra før området blev bebygget omkring 1960.

3.2 Fors boringer

Fors har i forbindelse med projektet fået etableret i alt seks boringer på grunde som ejes af Fors. Det drejer sig om:

- Boring 206.2570. En 2 m boring på Baldersvej 30B udført af brøndborefirmaet Brøker A/S
- Boring 206.2569. En 5 m boring på Baldersvej 30B udført af brøndborefirmaet Brøker A/S
- Boring 206.2568. En 2 m boring på Valhalvej 55 udført af brøndborefirmaet Brøker A/S
- Boring 206.2567. En 5 m boring på Valhalvej 55 udført af brøndborefirmaet Brøker A/S
- Boring 206.2574. En 6½ m boring på Valhalvej 55 udført af GEUS med hjælp af Jeppe Eriksen og Vandgruppen.
- Boring 206.2575. En 12 m boring på Valhalvej 55 udført af GEUS med hjælp af Jeppe Eriksen og Vandgruppen.

Borebeskrivelser af alle seks boringer er indrapporteret til den nationale boringsdatabase Jupiter.

Formålet med de fire boringer udført af Brøker var at måle grundvandsstand, og der blev installeret automatiske loggere i alle fire boringer. Data fra disse loggere kan ses i Bilag B.

Hovedformålet med de to boringer udført af GEUS var at finde et sandlag, som ifølge borerapporterne fra de tre vandindvindingsboringer skulle findes i 8-10 m dybde. En boring til et sådant sandlag ville kunne tjene flere formål:

- Ved at måle grundvandstrykniveau og sammenholde med trykniveauet i de dybe kalkboringer og i de terrænnære boringer, ville vi kunne få nyttige data om vekselvirkningen mellem trykniveauet i kalken og det terrænnære grundvandsspejl.
- Oppumpning fra sandlaget kunne måske være en teknisk mulighed som en kollektiv afværgeforanstaltning (som dog nok ville kræve en dispensation fra gældende lovgivning), såfremt effekten af lukning af Haraldsborg Vandværk viste sig at være betydelig.

Boring 206.2574 stoppede ved en stor sten i 6½ m dybde, mens boring 206.2575 til 12 m ikke viste noget spor af et sandlag. Da der samtidig kort forinden var lavet geotekniske boringer til 16 m dybde uden spor af sandlag i forbindelse med etablering af et forsinkelsesbassin ved Galgebakken renseanlæg på Klostervej 23 (ca. 300 m væk), konkluderede vi, at tolkningerne af de gamle boringer fra 1957 formentlig var misvisende, og at der ikke findes noget gennemgående sandlag i ca. 10 m dybde. Der blev efterfølgende sat dataloggere i de to boringer samt i de to kalkboringer. Data herfra kan ses i Bilag B. Figur 8 viser billeder fra borearbejdet.

Figur 8. Rolige og mindre rolige øjeblikke fra borearbejdet med GEUS' borerig.

3.3 Geofysiske undersøgelser

For at bekræfte eller afkræfte konklusionen fra 12 m boringen på Valhalvej 55 (206.2575) om, at der ikke findes noget sandlag i ca. 10 m dybde, gennemførte Jeppe Eriksen to typer geofysiske undersøgelser i området:

- Borehulslogs. Det blev lavet såkaldt gammalogs i 12 m boringen. Det sker ved at sænke en elektrode, som måler den naturlige gammastråling, som jordlagene udsender. Lerlag og sandlag udsender forskellige mængder gammastråling, hvilket gør det muligt med rimelig stor sikkerhed at skelne mellem sandlag og lerlag.
- Geoelektrik. Her måles jordlagenes elektriske modstand ved at sende elektrisk strøm gennem jordlagene. Der blev benyttet 96 jordspyd langs et 95 m langt trace beliggende på Valhalvej 55, Valhalvej 49 og Valhalvej 49B som vist på Figur 9. Jordlagenes elektriske modstand indikerer, om der er tale om sandlag (høj modstand) eller lerlag (lav modstand).

Resultaterne kan ses i Eriksen (2019). Resultaterne fra begge geofysiske målinger viste, at der ikke er tegn på sandlag.

Figur 9. Placeringen af andre elektriske ledninger i undergrunden (A) og traceet for geolelektrik målinger (A og B). Figurer fra Eriksen (2019)

3.4 Pumpeforsøget

Et væsentligt element i projektet var, at oppumpningen skulle varieres i løbet af perioden, hvor der skulle indsamles data for at vurdere, om det var muligt at se effekten af oppumpning på terrænnære grundvandsforhold. Ifølge den oprindelige plan skulle oppumpningen varieres som følger:

- 2018 oppumpning af ca. 130.000 m^3/år
- 2019 oppumpning af ca. 400.000 m^3/år
- 2020 oppumpning af 0 m^3/år

Formålet med uændret oppumpning hele år var dels at give trykændringen fra kalken tid til at nå op til terræn og dels at tage høje for at vejrmæssige variationer ikke dominerede. Grundet projektafkortning med et år, krævet af Roskilde Kommunes Klima og Miljøudvalg (KMU), besluttede vi at eksperimentere med kortere perioder med varierende oppumpning:

- Indtil 01.02.2019: ca. 15 m^3/time svarende til 130.000 m^3/år
- 01.02.2019 – 04.06.2019: ca. 45 m^3/time svarende til 400.000 m^3/år
- 04.06.2019 – 07/18.09.2019: 0 m^3/år (den ene pumpe startede igen 07.09 og den anden 18.09)
- 07/18.09.2019 – 13.01.2020: ca. 45 m^3/time svarende til 400.000 m^3/år
- Efter 13.01.2020: 0 m^3/år

3.5 Drænende effekt fra ledningsnet – TV inspektion Ægirsvej

For at undersøge om nettet af spildevands- og regnvandsrør har en drænende effekt i området har Fors analyseret rørenes tilstand. Herefter blev den rørstrækning udvalgt, som blev vurderet til at være i dårligst tilstand med størst risiko for at være utæt og dermed have en drænende effekt. Det var Ægirsvej. Her blev der lavet en TV inspektion af rørledningen en nat i foråret 2019, hvor der ikke var noget vandforbrug. TV inspektionen viste, at der ingen indsivning er i Fors' ledninger i vejen, dvs. de er tætte. Derimod blev der konstateret indstrømning fra nogle af stikledningerne. Eftersom der ikke var noget vandforbrug, tyder det på, at nogle af stikledningerne har en drænende effekt.

Derudover er der fjernvarmeledninger i vejene i området. Fjernvarmeledninger har typisk et trace med ½-1 m^2 grus omkring rørene. Fjernvarmetraceerne krydser ofte stikledninger til spildevandsnettet i en afstand, der gør der muligt for eventuelle vandstrømninger i fjernvarmetraceer at finde vej via stikledninger til spildevandnettet.

Samlet set vurderes, at der er muligheder for at ledningsnettet i sin helhed kan have en drænende effekt.

3.6 Vandmængder fra omfangsdræn

Blandt de 21 grundejere som bidrog med pejledata er der 6 huse med omfangsdræn. En af grundejerne (Valhalvej 50) målte vandmængden fra det ene af husets to omfangsdræn, hvor vandet fra omfangsdræn løber ind i en brønd under kældergulvet, hvorfra vandet pumpes op i faldstammen. Målingerne bestod i at registrere, hvor ofte pumpen starter. Hver pumpning starter, når vandspejlet i pumpebrønden stiger til én kote, og stopper, når vandspejlet falder til en anden (lavere) kote, så vandmængden, der fjernes ved hver pumpestart er konstant (32 l).

Herefter er de oppumpede vandmængder fra omfangsdrænet plottet i forhold til pejledata fra grunden og der er fundet en signifikant sammenhæng, så vi kan estimere, hvor meget vand, der løber til omfangsdrænet som funktion af højden af grundvandsspejlet.

Yderligere detaljer og data fremgår af Bilag C.

4. Jeppe Eriksens model

4.1 Beskrivelse af modellen

Jeppe Eriksen opstillede som en del af sit kandidatspeciale en hydrologisk model for området omkring Haraldsborg Vandværk. Modellen er beskrevet i Eriksen (2019), og her gives kun et resume.

Modellen er baseret på MIKE SHE softwaresystemet, som er velegnet til at analysere samspillet mellem overfladevand (nedbør, fordampning) og grundvandsforhold. MIKE SHE er et af standardværktøjerne som anvendes af rådgivende firmaer og bl.a. har været anvendt til Rambølls modeller for Roskilde området.

Jeppes model dækker et område på ca. 1200 m x 1200 m (Figur 10) horisontalt og ca. 50 m vertikalt. Modellens afgrænsninger (randbetingelser) er:

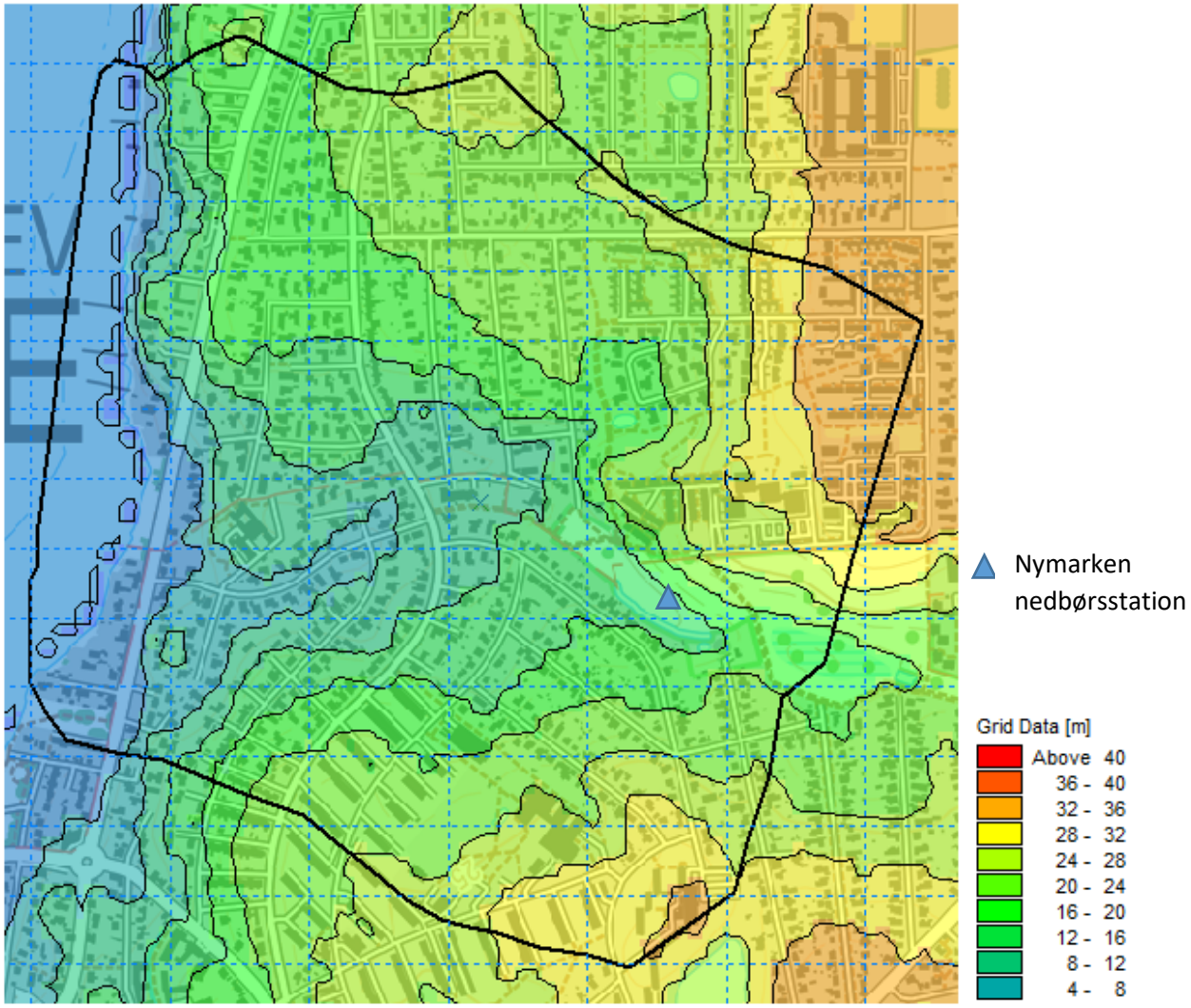
- Top, dvs. øvre rand: Daglig nedbør og potentiel fordampning. Nedbøren er fra DMI's nedbørsstation Nymarken, som ligger inden for området (Figur 10), mens den potentielle fordampning er beregnede tal fra DMI for et 20 km grid.
- Mod nord, syd, øst: Lukket rand, dvs. intet vand strømmer på tværs af randen. Randene mod nord og syd følger vandskel, så her er "ingen strømning" en naturlig forudsætning. Ved den østlige rand skråner terrænet fra øst mod vest, og der vil derfor i realiteten strømme noget vand ind over randen. Eksperimenter med modellen har vist, at indstrømningen over randen kun har lokal betydning for det terrænnære grundvandsspejl og ikke påvirker forholdene i området med Vandgruppens pejlenetværk. Eftersom en model med lukket rand er mange gange hurtigere at arbejde med, er den løsning valgt.
- Mod vest i Roskilde Fjord: Fastholdt trykniveau i det øverste lag svarende til kote 0 (havspejlsniveau). Og lukket rand for de nederste tre beregningslag.

Modellen har et horisontalt beregningsnet på 10 m. Modellen har indbygget data om befæstning (huse, veje), omfangsdræn og andre rørtraceer, som kan tænkes at påvirke det terrænnære grundvandsspejl.

Modellen beskriver, hvordan vandet strømmer i området med hensyn til:

- Nedbør, baseret på daglige værdier for observeret nedbør. Den observerede nedbør undervurderer, hvor meget nedbør der falder, fordi nedbørsmåleren står i 1½ m højde, hvor vinden giver anledning til turbulens. Derfor korrigeres (opjusteres) nedbørstallene med månedlige korrektionsfaktorer som i gennemsnit svarer til at opjustere nedbøren med ca. 15% (Vejen et al., 2014).
- Opsplitning mellem nedbøren i overfladeafstrømning (fra tage og veje) og infiltration af vand ned i jorden, hvor den i første omgang bidrager til at øge vandindholdet i rodzonen og ved højt vandindhold i rodzonen perkolerer ned til det øverste, terrænnære grundvandsspejl, som herved stiger.
- Fordampning, der beregnes som funktion af den klimabestemte øvre grænse (potentiel fordampning) som reduceres, hvis vandindholdet i rodzonen er lav. Fordampning tages fra nedbøren, og på nedbørsfrie dage fra vandindholdet i rodzonen, der herved tørrer ud.
- Vandstrømning i grundvandszonen beskrives i et 3-dimensionalt beregningsnet, med kassestørrelser, som horisontalt er 10 m og vertikalt er opdelt i 4 lag, som følger geologien. Vandstrømningerne beregnes som et produkt af den hydrauliske ledningsevne (et mål for jordlagenes permeabilitet – en stor værdi for sand og en lille værdi for ler) og en trykgradient (forskellen i grundvandstryk mellem to naboceller divideret med afstanden mellem de to celler). Vandstrømningerne vil nogle steder i området være domineret af horisontale strømninger (fra bakkerne til de lave områder) og andre steder af vertikale strømninger (jfr, Figur 3). Modellen

beregner grundvandtrykket, som i den øverste celle svarer til det terrænnære grundvandsspejl, i alle celler hver dag i hele beregningsperioden på flere år.



Figur 10. Udstrækningen af den hydrologiske model (sort streg) vist på et kort med højdekurver for terrænet. Figur fra Eriksen (2019). Placeringen af nedbørsstationen er vist med blå trekant.

De eksisterende traceer af spildevands- og regnvandsrør i området fremgår af Figur 4. Figur 11 viser de rørtraceer, der er indlagt i modellen som drænende vandløb med fastholdt trykniveau svarende til dybde af rørene. I første omgang blev rørtraceerne markeret med blåt i Figur 11 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 11, 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 pågældende rør er strømpeforet og formentlig tæt, så måske sker dræningen via stikledninger fra husene.

Figur 11. Placering af rørtracer, som er indlagt i modellen. De blå er lagt ind som vandløb, mens den orange streng er indlagt som dræn. Figur fra Eriksen (2019).

4.2 Kalibreringsresultater og vurdering af modellen

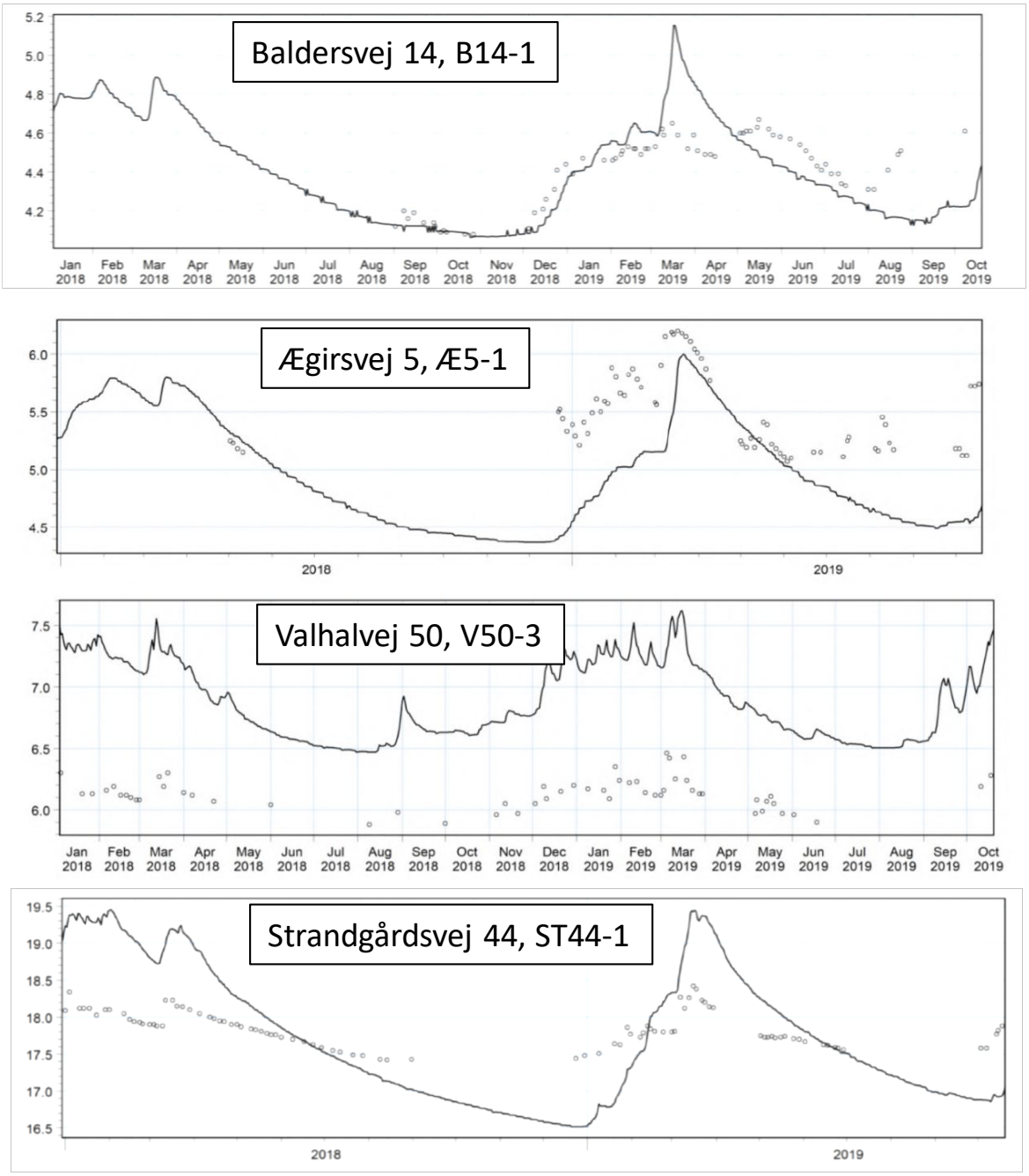
Modellen er kalibreret mod pejledata fra Vandgruppens netværk af boringer. Kalibreringen er sket ved en kombination af autokalibrering ved brug af parameteroptimeringsværktøjet Autocal og manuel kalibrering. Eksempler på modellens simuleringer af grundvandsspejl er illustreret i Figur 12. Modellens evne til at simulere observerede grundvandsspejl kan karakteriseres som følger:

- Modellen giver i store træk en god beskrivelse af den observerede tidsvarierede dynamik, inklusive årstidsfluktuationer. Ved tre af boringerne (B14-1, Æ5-1, V50-3) er forskellen mellem høj og lav grundvandsspejl i vinter/sommer (amplituden) beskrevet nogenlunde, mens modellen simulerer alt for stor årstidsvariation ved ST44-1, som ligger 700 m ved den nordlige modelrand – uden for det centrale interesseområde.
- Modellen simulerer ofte niveauet forskudt, fx ved V50-3.
- Modellen er ofte ikke i stand til helt af beskrive forskellene mellem observationsboringer på samme grund. Det kan skyldes, at modellens cellestørrelse på 10 m ikke giver mulighed for at beskrive lokale forhold som topografi, der nogle steder kan variere ½ m inden for en beregningscelle, eller lokale forskelle i jordens beskaffenhed. Ligeledes er placeringen af stikledninger på de enkelte grunde ikke kendt, og der er derfor ikke taget højde for deres drænende effekt.

Modellens nøjagtighed er bedre end traditionelle grundvandsmodeller, hvis der måles med traditionelle nøjagtighedskriterier som fx middelfejl (ME) eller kvadratafvigelsessum (RMSE) - se definitioner på ME og RMSE afsnit 4.7.5 i Refsgaard et al. (2010). Min vurdering er, at Jeppes model er markant bedre end Rambølls model til at forudsige effekter af ændret oppumpning fra kalkmagasinet. Den vurdering baseres på, at Jeppes model er i stand til at simulere den tidslige variation af det terrænnære grundvandsspejl, og at Jeppes model - i modsætning til Rambølls model - har følgende kvaliteter:

- Jeppes model tager højde for rørtraceers drænende effekt og for befæstningsgrader.

- Jeppes model har en langt mere detaljeret stedlig opløsning (10 m celler i stedet for 100 m celler).
- Jeppes model er blevet kalibreret og testet imod et stærkt datasæt med observationer af tidslige og stedlige variationer i terrænnært grundvandsspejl.



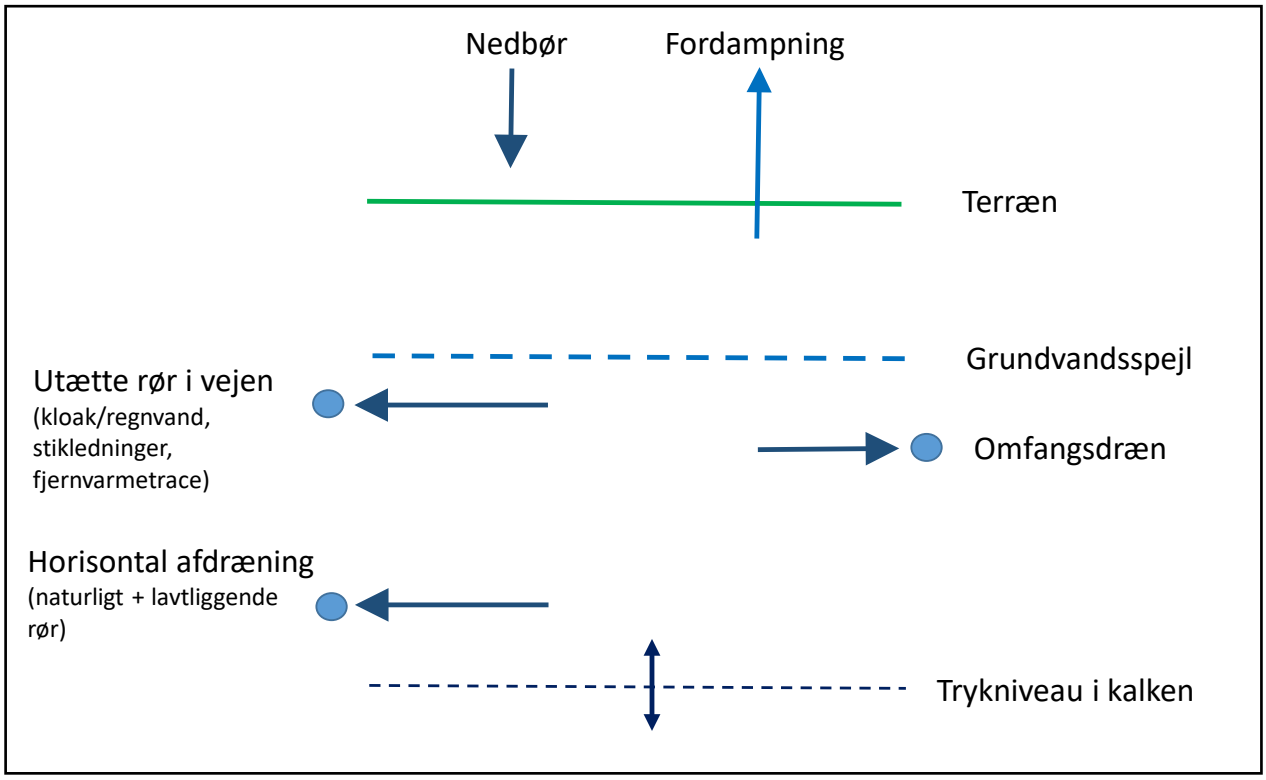
Figur 12. Sammenligning mellem modelberegnede (fuld optrukne linier) og observerede (cirkler) grundvandsspejl ved fire pejleboringer. Bemærk at observationerne ved B14-1 først startede i september 2018, og at kortere eller længere perioder uden observationer i de tre andre boringer i sommermånederne i 2018 og 2019 skyldes, at boringerne var tørre, dvs. at grundvandspejlet var lavere end den laveste observation, som vises på figurerne.

5. JCR-modellen

5.1 Beskrivelse af modellen

Som supplement til Jeppes model har jeg udviklet en simpel vandbalancemodel – i det følgende benævnt JCR-modellen. Modelkonceptet, som er illustreret i Figur 13, er karakteriseret ved følgende:

- Modellen består af vandbalanceberegninger baseret på simpelt vand-bogholderi for enkeltboringer. Der er lavet modeller for de 34 boringer, hvor der vurderedes at være tilstrækkelige observationer af god kvalitet. Dvs. at modellen består af 34 parallelle søjler uden horisontal vandudveksling mellem søjlerne.
- Modellen opererer med daglige tidsskridt og drevet af observerede data fra samme nedbørsstation og potentiel fordampning som Jeppes 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 1.
- Der laves simuleringer for perioden fra 1.1.2017 til 31.03.2020 – der vises dog kun resultater fra perioden 1.7.2017 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.



Figur 13. Konceptuel skitse for JCR model

7 af de 13 modelparametre er fastsat ud fra data fra de enkelte grunde og varierer derfor fra boring til boring. De resterende 6 modelparametre er bestemt ved kalibrering med samme værdier for alle 34 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 en model for hele området, som er bundet sammen af de 6 universelle (kalibrerede) parameterværdier.

Tabel 1. Parametre i JCR-modellen

Parameter	Beskrivelse	Værdi	Bestemmes hvordan
Terrænkote			GPS målinger - Tabel A.1
Θ_{max}	Maximalt vandindhold i rodzone	180 mm	***Kalibrering***
Θ_{s}	Vandindhold i rodzone, hvor grundvandsdannelse starter	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 - Figur B.1
K_{v}	Hydraulisk ledningsevne i 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

Modellens beskrivelser af vandbevægelser er baseret på følgende beregninger med tidsskridt på en dag:

- *Nedbør og fordampning*. Hver dag indlæses en daglig nedbør og en potentiel fordampning. Den potentielle fordampning er et udtryk for den maksimale vandmængde, der kan fordampe, hvis der er vand nok til rådighed. Den vandmængde, der reelt fordamper (aktuel fordampning), fjernes fra modellen.
- *Aktuel fordampning (E_a)*. Den aktuelle fordampning er lig den potentielle fordampning (E_p), hvis nedbøren er større end den potentielle fordampning. Hvis der ingen nedbør er, beregnes den aktuelle fordampning som

$$E_a = E_p \sqrt{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$$

hvor

E_a = *aktuel fordampning [mm/dag]*
E_p = *potentiel fordampning [mm/dag]*
θ = *vandindhold i rodzonen [mm]*
θ_{max} = *maksimalt vandindhold i rodzonen [mm] {parameter – Tabel 1}*

- *Grundvandsdannelse*. Grundvandsdannelsen, dvs. vandstrømningen fra rodzonen til det terrænnære grundvand, foregår på de dage, hvor nedbøren er større end fordampningen. Den beregnes som

$$G = (P-E_a)\frac{\theta-\theta_s}{\theta_{max}-\theta_s}$$

hvor

G = = *grundvandsdannelse [mm/dag]*
P = *nedbør [mm/dag]*
E_a = *aktuel fordampning [mm/dag]*
θ = *vandindhold i rodzonen [mm]*
θ_s = *minimum vandindhold i rodzonen for grundvandsdannelse [mm] {parameter – Tabel 1}*
θ_{max} = *maksimalt vandindhold i rodzonen [mm] {parameter – Tabel 1}*

- *Rodzonen*. Vandindholdet kan variere mellem 0 og θ_{max}. Vandindholdet beregnes som:

$$\theta_{i\,dag} = \theta_{i\,går} + P - E_a - G$$

- *Udstrømning til omfangsdræn*. Udstrømningen fra grundvandszonen til omfangsdræn beregnes kun for de grunde, hvor huset har et omfangsdræn (bortset fra Ægirsvej 5, hvor omfangsdrænet i Ægirsvej 7 ligger meget tæt på). Udstrømningen sættes til nul, hvis grundvandsspejlet er lavere end koten til omfangsdrænet. For højere grundvandsspejl beregnes den som:

$$Q_{omf\text{-}dræn} = (GVSP - H_{omf\text{-}dræn})\ DR_{omf\text{-}dræn}$$

hvor
$Q_{omf\text{-}dræn}$ = *udstrømning til omfangsdræn [mm/dag]*
GVSP = *kote for det terrænnære grundvandsspejl [m over havniveau]*
$H_{omf\text{-}dræn}$ = *kote for omfangsdræn [m over havniveau] {parameter – Tabel 1}*
$DR_{omf\text{-}dræn}$ = *drænkoefficient omfangsdræn [mm vand pr m grundvandsspejl over drænniveau/dag] {parameter – Tabel 1}*

- *Udstrømning til horisontalt dræn - top*. Udstrømningen fra grundvandszonen til højtbeliggende dræn, som kan repræsentere højtliggende rør eller andre muligheder for horisontale vandstrømninger væk fra grunden i øvre jordlag, beregnes såfremt grundvandsspejlet står højere end koten til det øvre horisontale dræn. Den beregnes som:

$$Q_{top\text{-}dræn} = (GVSP - H_{top\text{-}dræn})\ 1000\ S_y\ DR_{top\text{-}dræn}$$

hvor
$Q_{top\text{-}dræn}$ = *udstrømning til øvre horisontale dræn [mm/dag]*
GVSP = *kote for det terrænnære grundvandsspejl [m over havniveau]*
$H_{top\text{-}dræn}$ = *kote for øvre horisontale dræn [m over havniveau] {parameter – Tabel 1}*
1000 = *[mm/m]*
S_y = *magasintal for det terrænnære grundvand, dvs. den vandmængde der frigives når vandspejlet falder en m [m/m] {parameter – Tabel 1}*
$DR_{top\text{-}dræn}$ = *drænkoefficient øvre horisontale dræn [fraktion af vandet over top-dræn/dag] {parameter – Tabel 1}*

- *Udstrømning til horisontalt dræn - bund*. Udstrømningen fra grundvandszonen til lavtbeliggende dræn, som kan repræsentere lavtliggende rør eller andre muligheder for horisontale vandstrømninger væk fra grunden i dybere jordlag, beregnes såfremt grundvandsspejlet står højere end koten til det nedre horisontale dræn. Den beregnes som:

$$Q_{bund\text{-}dræn} = (GVSP - H_{bund\text{-}dræn})\ 1000\ S_y\ DR_{bund\text{-}dræn}$$

hvor
$Q_{bund\text{-}dræn}$ = *udstrømning til nedre horisontale dræn [mm/dag]*
GVSP = *kote for det terrænnære grundvandsspejl [m over havniveau]*
$H_{bund\text{-}dræn}$ = *kote for nedre horisontale dræn [m over havniveau] {parameter – Tabel 1}*
1000 = *[mm/m]*

S_y = magasintal for det terrænnære grundvand, dvs. den vandmængde der frigives når vandspejlet falder en m [m/m] {parameter – Tabel 1}
$DR_{bund\text{-}dræn}$ = drænkoefficient nedre horisontale dræn [fraktion af vandet over bund-dræn/dag] {parameter – Tabel 1}

- *Vertikal strømning i moræneleret.* Den vertikale strømning mellem kalklaget og det terrænnære grundvand beregnes som en funktion af trykforskellen mellem grundvandstrykket i kalkmagasinet og det terrænnære grundvandsspejl:

$$Q_{kalk} = \frac{GVSP - H_{kalk}}{20} K_v$$

hvor
Q_{kalk} = vertikal vandstrømning gennem moræneleret [mm/dag]
GVSP = kote for det terrænnære grundvandsspejl [m over havniveau]
H_{kalk} = kote for grundvandstrykniveauet i kalkmagasinet [m over havniveau] {parameter – Tabel 1}
20 = tykkelse af moræneleret [m]
K_v = hydraulisk ledningsevne af moræneleret [mm/dag] {parameter – Tabel 1}

- *Grundvandsspejl*. Koten til det terrænnære grundvandsspejl bestemmes ved en simpel vandbalanceberegning

$$GVSP_{i\ dag} = GVSP_{i\ går} + (G - Q_{omf\text{-}dræn} - Q_{top\text{-}dræn} - Q_{bund\text{-}dræn} - Q_{kalk})1000/S_y$$

hvor
GVSP = kote for det terrænnære grundvandsspejl [m over havniveau]
G = grundvandsdannelse [mm/dag]
$Q_{omf\text{-}dræn}$ = udstrømning til omfangsdræn [mm/dag]
$Q_{top\text{-}dræn}$ = udstrømning til øvre horisontale dræn [mm/dag]
$Q_{bund\text{-}dræn}$ = udstrømning til nedre horisontale dræn [mm/dag]
Q_{kalk} = vertikal vandstrømning gennem moræneleret [mm/dag]
1000 = [mm/m]
S_y = magasintal for det terrænnære grundvand, dvs. den vandmængde der frigives når vandspejlet falder en m [m/m] {parameter – Tabel 1}

- *Drænkoefficienter – justering for afstand til dræn*. De tre drænkoefficienter ($DR_{omf\text{-}dræn}$, $DR_{top\text{-}dræn}$, $DR_{bund\text{-}dræn}$) er justeret med en faktor, som varierer fra boring til boring afhængig af afstanden fra boring til nærmeste dræn ved hjælp af følgende formel (se Bilag D for detaljer):

$$DR_x = DR_{x_ref} \frac{L-x}{L-x_ref} \sqrt{\frac{2\,L\,x_ref - x_ref^2}{2\,L\,x - x^2}}$$

hvor
DR_x = drænkoefficient for boring med afstand x til nærmeste rør
DR_{x_ref} = drænkoefficient i referenceafstand fra nærmeste rør. Det er disse parameterværdier der er angivet i Tabel 1
X = afstand fra pejleboring til nærmeste rør
L = 35 m
X_ref = 5 m for omfangsdræn og 10 m for horisontale top og bunddræn

5.2 Resultater fra kalibrering, validering og vurdering af modellen

De 6 ”frie” modelparametre (Tabel 1) er bestemt ved kalibrering af modellen mod observationsdata fra 4 af de 34 pejleboringer (B10-1, Æ5-1, V50-3, ST44-1). De fire boringer er valgt blandt boringer, der startede observationer i 2017. Derudover repræsenterer de forskellige forhold i form af lavtliggende terræn med meget højt grundvandsstand (B10-1 og Æ5-1), påvirkning fra omfangsdræn (V50-3) og højtliggende terræn med relativt dyb grundvandsstand (ST44-1).

Kalibreringen er foregået manuelt efter ”trial-and-error” metoden. Dvs. at der laves en modelsimulering med et sæt parameterværdier. Efter vurdering af, hvor god modellen er til at reproducere de målte grundvandsspejl i de fire boringer, ændres nogle af de seks parameterværdier, og der foretages en ny modelsimulering. Dette gentages, indtil modelsimuleringerne ikke kan blive bedre. Godheden af en modelsimulering vurderes ud fra ét visuelt og tre numeriske kriterier:

- En visuel vurdering af grafer for simulerede og observerede grundvandsspejl – hvor godt er modellen i stand til at simulere dynamikken i de observerede grundvandsspejl?
- Middelfejl (ME), dvs. gennemsnittet af simuleret minus observeret grundvandsspejl for de datoer, hvor der er observationer. ME er en indikator for, hvor god modellen er til at simulere niveauet af det terrænnære grundvandsspejl.
- Root mean square error (RMSE), dvs. kvadratroden af den gennemsnitlige kvadrerede afvigelse mellem simulerede og observerede værdier. RMSE er en indikator for, hvor godt modellen kan simulere de enkelte observationer.
- Middelfejl på max grundvandsspejl, dvs. det højeste simulerede grundvandsspejl minus det højeste målte grundvandsspejl i hele perioden 01.07.2017 – 31.03.2020, idet der kun vælges data for de datoer, hvor der er lavet observationer.

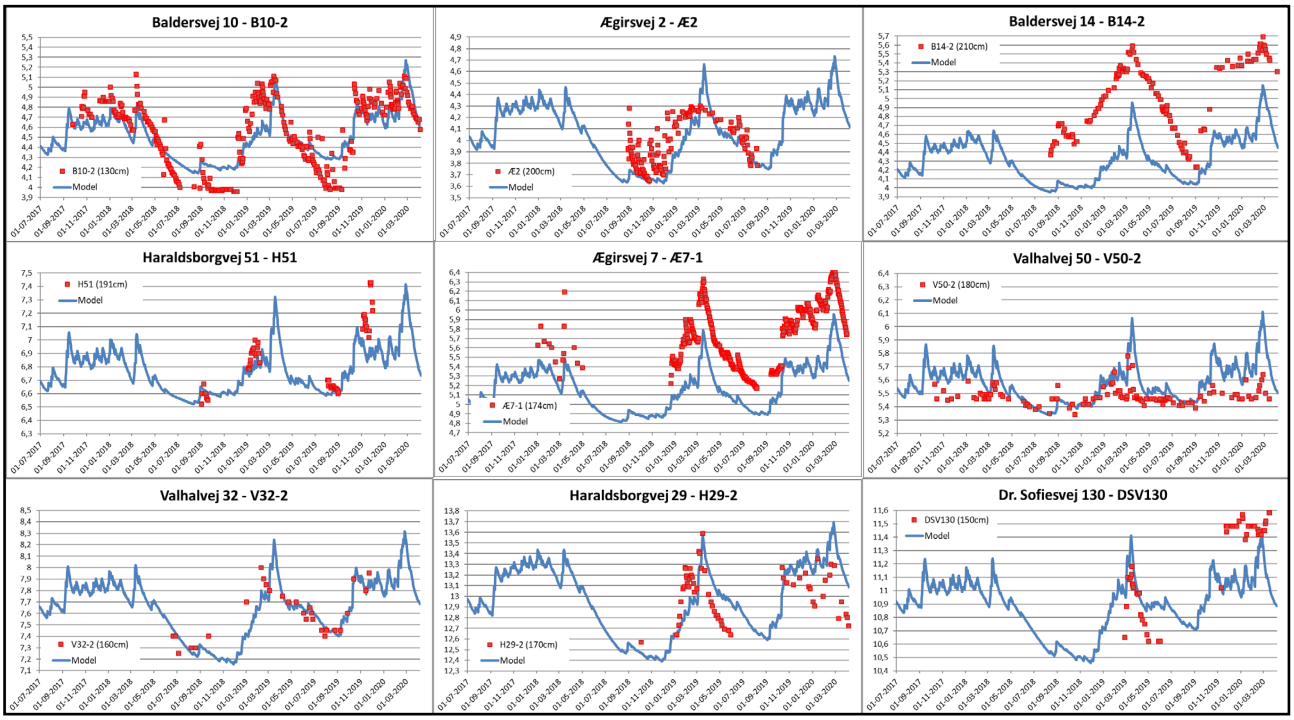
ME og RMSE er standard nøjagtighedskriterier i grundvandsmodellering (Refsgaard et al., 2010). Den sidste indikator, middelfejlen på max grundvandsspejl, viser modellens evne til specifikt at simulere den maksimale grundvandsstand. Fordi hele formålet med projektet er at vurdere risici for højt grundvandsspejl, er denne nøjagtighedsindikator tillagt stor vægt i kalibreringen.

Efterfølgende er de seks kalibrerede parameterværdier overført til de øvrige 30 boringer (validering). De tre numeriske indikatorer for nøjagtigheden af modelsimuleringer fra kalibrering mod de fire boringer og den efterfølgende simulering af de øvrige 30 boringer (valideringstests) er angivet i Tabel 2. Som det fremgår af tabellen, viser valideringsresultaterne nogenlunde samme nøjagtighed som kalibreringsresultaterne.

Tabel 2. Resume af nøjagtigheden af JCR-modellen i kaliberingssituation og ved blindtest mod 30 boringer for perioden fra sommeren 2017 til marts 2020. Resultaterne fra valideringen kan forventes, at repræsentere den nøjagtighed modellen vil have for andre lokaliteter i området, herunder for punkter/grunde, hvor der ikke er observationer.

	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

Alle simuleringsresultater er vist i Bilag E. Figur 14 viser resultater fra ni af de pejleboringer, som ikke har været benyttet til kalibrering. De ni boringer er udvalgt, så de indeholder eksempler på både gode og mindre gode overensstemmelser mellem model og pejledata. Ved en sammenligning mellem de modelsimulerede værdier (fuldoptrukne blå kurver) og observationer (røde punkter) skal der tages højde for, at de fleste boringer ikke har observationer hver dag, hvorfor hændelserne med maksimale grundvandsspejl kan synes mere "spidse" i modelsimuleringerne end i observationsdata.



Figur 14. Modelsimuleringer sammenlignet med pejledata fra ni boringer, som ikke har været benyttet til kalibrering (valideringstest).

Simuleringer og data fra de ni boringer viser bl.a.:

- *B10-2*. Her simuleres en god dynamik og et korrekt niveau for grundvejsspejl om vinteren. Maximum grundvandspejl undersimuleres i 2018, rammer godt i 2019 og oversimuleres i 2020. Modellen simulerer for højt grundvandsspejl om sommeren.
- *Æ2*. Her simuleres generelt et korrekt niveau både sommer og vinter. Men dynamikken i pejledata i efteråret 2018 reproduceres ikke særlig godt. Det maksimale grundvandsspejl oversimuleres.
- *B14-2*. Her simuleres et grundvandsspejl, der er 50-80 cm lavere end pejledata viser. Modelsimuleringen viser lavt grundvandsspejl, fordi der i modellen er indlagt et omfangsdræn. Den store uoverensstemmelse kan måske skyldes, at omfangsdrænet ikke har så stor effektivitet, som modellen forudsætter, eller der kan være andre lokale forhold, som ikke er repræsenteret korrekt i modellen.
- *H51*. Her er der ikke så mange pejledata. Modellen passer særdeles fint med observationerne i perioden september 2018 til september 2019, mens modellen undersimulerer med 20-50 cm i november 2019.

- *Æ7-1*. Den ligner lidt B14-2 med en simulering der konsekvent er for lavt (20-50 cm). Her er også omfangsdræn. Uoverensstemmelsen kan måske skyldes at omfangsdrænet ikke har så stor effektivitet, som modellen forudsætter, eller at det målte grundvandsspejl påvirkes af betydelig horisontal strømning fra højtliggende terræn på nabogrunden (den effekt er ikke repræsenteret i modellen).
- *V50*-2. Hverken modellen eller pejledata viser de samme typiske årstidsvariationer, som ses i mange af de øvrige boringer. Det skyldes et omfangsdræn, som holder grundvandsspejlet nede i mere end en meters dybde i hele perioden. Modellen oversimulerer de maksimale grundvandsspejl.
- *V32-2*. En god overensstemmelse mellem model og pejledata med hensyn til dynamik (årstidsvariation) og max værdier.
- *H29-2*. En rimelig god overensstemmelse mellem model og plejeldata med hensyn til dynamik (årstidsvariation). Det maksimale grundvandsspejl simuleres nøjagtigt i 2019, mens værdierne i 2020 oversimuleres.
- *DSV-130*. Her er ikke nogen god overensstemmelse mellem model og pejledata. Stigningen i grundvandsspejl i efteråret 2018 simuleres meget tidligere, end de ses i pejledata. De maksimale grundvandsspejl simuleres for højt i 2019 og for lavt i 2020 sammenlignet med observationerne. Der er omfangsdræn i nærheden af boringen, og i bunden af grunden er der en skrænt ned til stien med den rørlagte Ladegårdså.

5.3 Sammenligning af Jeppes model og JCR-modellen – ensemble modellering

Ud fra modelsimuleringer er det muligt at konkludere, at JCR-modellen lidt bedre er i stand til at simulere variationerne i pejledata, end Jeppes model er. På den anden side er der flere empiriske elementer i JCR-modellen end i Jeppes model, og det er derfor ikke muligt at konkludere noget sikkert om hvilken af modellerne, der bedst vil være til at forudsige effekter af ændret oppumpning eller effekter af klimaændringer.

Videnskabeligt er det erkendt, at selv om modeller kan være gode til at reproducere observerede data i en kalibreringsperiode, vil de ikke nødvendigvis være nøjagtige til at forudsige, hvad der sker, hvis de basale forhold ændrer sig. Og det er ikke muligt at teste modellers nøjagtighed for en situation, der svarer til et 2050 klima (de data får vi først om 30 år). Og selvom pumpeeksperimentet indeholder perioder uden oppumpning, og Jeppes model viser, at den, som et minimum, ikke er i modstrid med data herfra, har disse perioder været alt for korte til med betydelig sikkerhed at kunne skelne mellem effekter af ændret oppumpning og variabelt vejr. Den videnskabelige anbefaling i sådanne situationer er, at benytte en såkaldt ensemble modellerings strategi, dvs. at benytte flere forskellige modeller til at lave forudsigelser, og så efterfølgende vurdere usikkerheden på forudsigelserne.

Vi har to modeller, der begge har egenskaber, der muliggør, at de kan forudsige effekter af ændret oppumpning og ændret klima, og som begge giver rimeligt gode simuleringsresultater for den nuværende situation. Begge modeller må derfor karakteriseres som plausible. De to modeller er desuden fundamentalt forskellige, hvilket giver større robusthed i konklusionerne om, hvilke ændringer der kan forventes i det terrænnære grundvand, når der fremover sker ændringer i oppumpning og/eller i klimaet.

6. Lukning af Haraldsborg Vandværk

6.1 Analyse af max grundvandsspejl observeret i Vandgruppens pejlenetværk

Tabel 3 viser det maksimale grundvandsspejl der er observeret hver vinter, fra de pejleboringer, der havde observationer i alle tre år 2018, 2019, 2020. Tabellen viser også oppumpningsraten (målt som m^3/år) samt akkumuleret nedbør i de 7 og de 30 dage, der er forud for årsmax. Som det ses af tabellen, er der variationer mellem de forskellige boringer, men det årlige målte maksimale grundvandsspejl (= mindst dybde til grundvandsspejl) er langt overvejende højst i 2019, næsthøjst i 2020 og lavest i 2018.

Tabel 3. Maksimale grundvandsniveaer 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 kan således forventes at være upåvirket af ændret oppumpning.

Boring	2018		2019		2020		Forskel mellem årsmax (cm)		
	Dato	Dybde (cm)	Dato	Dybde (cm)	Dato	Dybde (cm)	2020-2018	2020-2019	2019-2018
B10-1	03-01-2018	25	13-03-2019	19	26-02-2020	19	-6	0	-6
B10-2	03-01-2018	42	13-03-2019	31	26-02-2020	33	-9	2	-11
Æ5-1	03-01-2018	61	17-03-2019	49	26-02-2020	50	-11	1	-12
Æ5-2	05-01-2018	65	17-03-2019	35	19-02-2020	41	-24	6	-30
Æ5-3	05-01-2018	150	09-03-2019	105	18-02-2020	132	-18	27	-45
Æ7-1	13-03-2018	71	17-03-2019	57	26-02-2020	46	-25	-11	-14
Æ7-2	13-03-2018	66	17-03-2019	63	26-02-2020	68	2	5	-3
Æ7-3	13-03-2018	90	17-03-2019	102	17-02-2020	98	8	-4	12
V50-1	05-01-2018	129	17-03-2019	130	26-02-2020	137	8	7	1
V50-2	05-01-2018	147	05-03-2019	128	26-02-2020	142	-5	14	-19
V50-3	05-01-2018	135	05-03-2019	119	26-02-2020	130	-5	11	-16
Gennemsnit alle boringer i området		***89***		***76***		***81***	***-8***	***5***	***-13***
ST44-1	04-01-2018	115	17-03-2019	105	26-02-2020	108	-7	3	-10
ST44-2	17-03-2018	161	17-03-2019	145	26-02-2020	150	-11	5	-16
Gennemsnit referenceboringer		***138***		***125***		***129***	***-9***	***4***	***-13***
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 m^3/år		400.000 m^3/år		0 m^3/år				

* Akkumuleret nedbør for henholdsvis 7 dage og 30 dage forud for 05-01-2018/13-03-2018, 17-03-2019, 26-02-2020

Den højeste grundvandsstand optræder således i 2019, som er den periode, hvor der pumpes mest (svarende til 400.000 m^3/år). Vintermånederne i både 2019 og 2020 var usædvanligt nedbørsrige med henholdsvis 138 mm og 147 m nedbør i de 30 dage forud for henholdsvis 17-03-2019 og 26-02-2020, hvor max grundvandsspejl forekom i de fleste boringer. Mens 2020 nedbøren i de 30 dage op til den maksimale hændelse således var lidt større i 2020 end i 2019, var nedbøren i ugen op til den maksimale hændelse til gengæld større i 2019 end i 2020. og det kan derfor være vanskeligt at sige entydigt, hvilket af de to år der ud fra nedbørsforhold skulle forventes at give højst grundvandsspejl. Dataene i Tabel 3 viser at 9 af de 11 boringer i selve området viser højst grundvandsspejl i 2019. Hvis alle boringer med gode data for de to maxi hændelser i 2019 og 2020 inddrages (ikke vist i tabellen) giver 16 ud af 23 boringer højst grundvandsspejl i 2019.

Vintrene 2019 og 2020 er derfor nogenlunde lige våde med hensyn til nedbør, mens nedbøren i 2018 er markant lavere. Det ses også, at de gennemsnitlige ændringer fra år til år for boringerne i området i praksis er identiske med data fra de to referenceboringer (ST44), som ligger så langt væk fra området, at de næppe er påvirket af ændringer i oppumpningen.

Dataene alene tyder derfor på, at effekten af kraftig nedbør er væsentlig større end effekten af ændret oppumpning.

6.2 Modelsimuleringer af pumpeeksperimentet

Pumpeeksperimentet med variationerne i oppumpning var tænkt som en mulighed for at observere eventuelle effekter af ændret oppumpning i pejleboringerne. Som vist i Tabel 4 og konkluderet i afsnit 6.1 har vi ikke kunnet detektere nogen effekt af ændret oppumpning på det terrænnære grundvandsspejl. Dataloggerne i Fors' boringer (Bilag B) viser tilsvarende, at effekten af ændret oppumpning slår fuld igennem i kalkmagasinet i løbet af et par dage, mens der ikke er nogen tydelig effekt i de terrænnære boringer.

Spørgsmålet er så, om den tilsyneladende manglende effekt skyldes, at det tager mange måneder eller måske år før effekten forplanter sig fra kalkmagasinet op gennem de 50 m jordlag og når helt op til det terrænnære grundvand, eller med andre ord om effekten er på vej men ikke kan ses, når vi kun ændrer oppumpningen i 3-5 måneder, som vi endte med at måtte gøre. [Det var for at undgå det dilemma, at pumpeeksperimentet oprindeligt var planlagt til at holde konstante pumpeydelser i et helt år ad gangen.]

Jeppes model er blevet benyttet til at analysere trykforplantningen fra kalken op gennem jordlagene (JCR-modellen kan ikke bruges til det formål). Konklusionen af de analyser er, at trykændringerne i kalken på ca. 1 m og ca. 2½ m ved ændret oppumpning henholdsvis i januar 2019 og juni 2019 (Figur B1) er 1-2 måneder om at nå op til terrænnære grundvandsspejl. Dvs. at konstant oppumpning i 3-5 måneder burde have været tilstrækkelig til at effekten af ændret oppumpning har stabiliseret sig også i det terrænnære grundvandsspejl, Men eftersom det terrænnære grundvandsspejl responderer hurtigt og kraftigt på nedbørshændelser, betyder det også, at der er stor sandsynlighed for at en effekt, der er 1-2 måneder om at nå frem, vil blive forstyrret inden da af tilfældigheder i vejret og derfor kan være meget vanskeligt at detektere, hvis effekten er lille i forhold til forstyrrelserne.

6.3 Model simuleringer af effekt af stop for oppumpning

6.3.1 Jeppes model

Beregninger med Jeppes model viser, at stop for oppumpningen vil resultere i stigning i det maksimale niveau for det terrænnære grundvandsspejl af størrelsesorden 5-10 cm med den største effekt i området omkring Ægirsvej, hvor terrænet er lavt (Figur 15).

Figur 15. Ændringer i det maksimale terrænnære grundvandsspejl ved stop af Haraldsborg Vandværk. De to figurer svarer til to forskellige antagelser om trykniveauændringen i kalken. Figur fra Eriksen (2019)

6.3.2 Følsomhedsanalyser – usikkerhed på hydraulisk ledningsevne i moræneleret

Den mest kritiske parameter for effekten af ændret oppumpning er den hydrauliske ledningsevne (K_v) for moræneleret mellem det terrænnære grundvand og kalkmagasinet. Jo større K_v værdi jo større vil effekten af ændret oppumpning være. I Jeppes model er K_v estimeret til 0,8 mm/dag, mens JCR-modellen benytter en værdi på 0,5 mm/dag. For at vurdere hvilket interval, der er realistisk for K_v værdi, er der lavet en følsomhedsanalyse med JCR-modellen. Resultaterne herfra er vist i Tabel 4 i form af maksimalt simuleret grundvandsspejl for fem forskellige K_v værdier.

Tabel 4. Følsomhedsanalyse med fem forskellige K_v værdier. Tabellen viser maksimalt simulerede grundvandspejl for perioden 2017-2020. Grundvandsspejl er angivet som kote i m over hav. Beregningerne er lavet med JCR-modellen.

K_v (mm/dag)	Tryk kalk (m over hav)	B10-1	B14-1	Æ5-1	V50-3	H29-2	DSV130	ST44-1
0,5	4,5	5,49	4,69	6,12	6,29	13,69	11,44	19,19
1,0	4,5	5,48	4,69	6,11	6,28	13,67	11,42	19,06
2,0	4,5	5,47	4,69	6,09	6,28	13,47	11,38	16,00
3,0	4,5	5,46	4,69	6,07	6,27	12,19	11,25	12,85
5,0	4,5	5,44	4,69	6,04	6,25	9,74	9,61	9,58

Tallene i tabellen kan sammenlignes med grafer i Figur 14 (H29-2 og DSV130) og i Bilag E (alle), hvor resultater med den kalibrerede K_v værdi (0,5 mm/dag) er vist. Resultaterne i tabellen viser, at der i praksis ikke er forskel mellem K_v værdier på 0,5 mm/dag, 1,0 mm/dag og 2,0 mm/dag for boringerne i Haraldsborg området, mens referenceboringen ST44-1, der ligger højt viser et for lavt grundvandsspejl for K_v = 2,0 mm/dag. En K_v værdi på 3,0 mm/dag resulterer i 150 cm hhv. 19 cm lavere grundvandsspejl for H29-2 og DSV130, som er blandt de højstbeliggende boringer i området. Figur 14 viser, at et max grundvandsspejl på 12,19 m for H29-2 virker urealistisk lavt sammenlignet med den observerede max værdi i 2019 på 13,60 m, og resultaterne for ST44 med et fald i grundvandsniveau på mere end 6 m er helt urealistisk. Tilsvarende er simuleringsresultaterne for K_v = 5,0 mm/dag helt urealistiske også for H29-2 og DSV130.

Konklusionen på følsomhedsanalysen er. at en K_v værdi i intervallet 0,5 – 2,0 mm/dag er realistisk, mens en K_v værdi på 3,0 har lav sandsynlighed, men måske ikke helt kan afvises at forekomme. Derimod forkastes en K_v værdi på 5,0 mm/dag som helt urealistisk.

6.3.3 JCR-modellen

Herefter er modellen blevet benyttet til at beregne effekten af at stoppe oppumpningen. Ændringen i maksimalt simuleret grundvandsspejl er vist i Tabel 5 for de fire K_v værdier. Det ses, at effekten er størst i lavtliggende område med grunde uden omfangsdræn (B10-1, Æ5-1), mens effekten er lavere på grunde med omfangsdræn (B14-1, V50-3). ST44-1 viser ingen effekt, fordi den er beliggende uden for det områd der påvirkes af ændret oppumpning.

Tabel 5. Effekt på det maksimale niveau af det terrænnære grundvandsspejl på syv udvalgte boringer af at stoppe oppumpningen til Haraldsborg Vandværk. Beregningerne er lavet med JCR-modellen.

Effekt af stop oppumpning (cm)	B10-1	B14-1	Æ5-1	V50-3	H29-2	DSV130	ST44-1
Kalibreret model (K_v = 0,5 mm/dag)	3	1	2	1	1	1	0
Følsomhed: K_v = 1,0 mm/dag	5	2	4	2	1	1	0
Følsomhed: K_v = 2,0 mm/dag	10	5	8	2	15	3	0
Følsomhed: K_v = 3,0 mm/dag	15	7	12	3	126	14	0

Resultaterne i Tabel 5 viser, at effekten i de mest kritiske områder af at lukke for Haraldsborg vandværk, ifølge JCR-modellen, mest sandsynligt vil ligge i intervallet 3-10 cm stigning i det maksimale grundvandsniveau med en lille sandsynlighed for op til 15 cm. Det bemærkes, at det i praksis er identisk med resultaterne fra Jeppes model, der forudsagde 5-10 cm i de værst udsatte områder.

7. Klimaændringer

Effekten af klimaændringer er blevet beregnet med begge modeller med anvendelse af lidt forskellige scenarier for det fremtidige klima.

7.1 Stigning i havniveauet – højere vandstand i Roskilde Fjord

Effekten af stigning i havniveauet er beregnet med Jeppes model ved at ændre vandstanden i Roskilde Fjord med en meter. Resultatet, som ses på kortet til venstre i Figur 16, viser, at stigning af vandstanden i Roskilde Fjord ikke har nogen praktisk effekt på området øst for Frederiksborgvej. Forklaringerne til den manglende effekt skal findes i to forhold:

- Der er i forvejen en gradient fra området omkring Haraldsborg Vandværk ud mod fjorden. Trykforskellen fra kalken til fjordens vandspejl vil være ca. 7 m uden havspejlsstigning og 6 med havspejlsstigning. Det kan medføre en lille stigning i trykniveauet i kalken (mindre end én meter), hvilket vil give noget mindre effekt end effekten på 5-10 cm ved lukningen af vandværket (se afsnit 6.3).
- Det terrænnære grundvandsspejl ligger i kote 4-13 m i området. Den horisontale gradient ud til havet vil selvfølgelig blive en anelse mindre, men den vil stadig være markant, og i øvrigt styres afdræningen af det terrænnære grundvand tilsyneladende i høj grad af rørtraceer, som er beliggende over det nye havniveau.

JCR-modellen kan ikke bruges til at beregne effekten af havspejlsstigninger.

7.2 Øget nedbør

Valg af klimascenarier indebære en kombination af et scenarium for, hvor meget drivhusgasser (CO_{2e}) der udledes i de kommende årtier og af hvilken klimamodel, der benyttes til at fremskrive klimaet baseret på drivhusgaskoncentrationerne i det valgte CO_{2e} scenarie. Der er stor forskel på resultaterne fra forskellige klimamodeller, og derfor benyttes ofte flere klimamodeller i en ensemble strategi.

I Jeppes model er benyttet følgende klimascenarier:

- *CO_{2e} scenarie*: Her er valgt det såkaldte RCP 8.5 scenarie. Det er et kraftigt CO_{2e} scenarie, der giver globale temperaturstigninger i 2100 på 4-6 grader.
- *Klimamodel*: Her er valgt den næst-vådeste blandt 15 klimamodeller, hvis resultater er tilgængelige i EUROCORDEX databasen. Med "næst-vådeste" menes, at det er den model, der forudsiger næst-størst øgning i nedbøren i 2100. Klimamodellen er den, der er benævnt IPSL-CMA5A i Pasten-Zapata et al. (2019), hvor principperne for bias korrektion af klimadataene er beskrevet.
- *Tidshorisont*: Der er lavet beregninger for klimaet i 2050 og i 2100.

I JCR-modellen er der benyttet følgende klimascenarier:

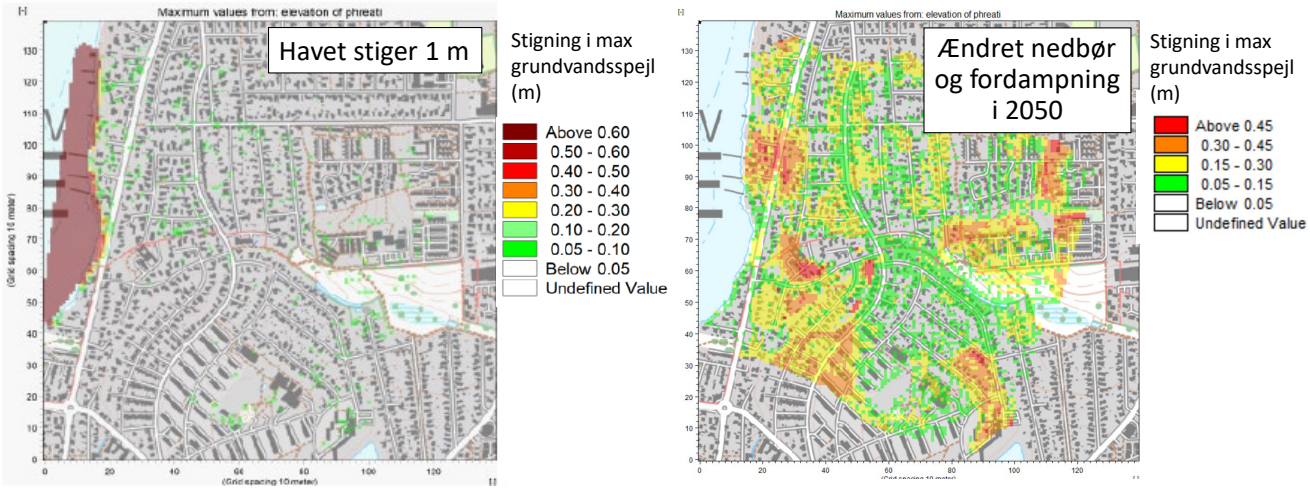
- *CO_{2e} scenarie*: Her er valgt den såkaldte A1B, som er et medium scenarium, som giver globale temperaturstigninger i 2100 på 2,5 – 4,5 grader.
- *Klimamodel*: Her er valgt tre klimamodeller blandt 11 modeller med data i ENSEMBLES databasen. De tre modeller er med udgangspunkt i Henriksen et al. (2012) valgte som den vådeste (ECHAM-HIRHAM), medianen (ECHAM-SMHI) og den tørreste (Arpege RM5.1) blandt de 11 modeller.

Klimafremskrivningerne er herefter foretaget ved hjælp af såkaldte Delta Change faktorer, som er publiceret i Appendix 1 i Seaby (2013).

- *Tidshorisont*: Der er lavet beregninger for klimaet i 2041-2070, hvilket i praksis svarer til 2050.

Klimascenariet som er valgt til Jeppes model er tæt på "worst case" med det kraftigste CO_{2e} scenarie og den næst-vådeste klimamodel. Det svarer omtrentlig til, eller er lidt kraftigere end, den "våde" klimamodel i JCR modellen scenarie, hvor der er valgt et medium CO_{2e} scenarie og den vådeste klimamodel. De to andre klimamodeller til JCR modellen svarer så til en mere sandsynlig (medium klimamodel) og en meget "best case" optimistisk (tør klimamodel).

Resultaterne fra beregningerne med Jeppes model for 2050 er vist i kortet til højre i Figur 16. Klimaændringerne forudsiges her at resultere i øget maksimalt grundvandsspejl på 30-40 cm i de mest kritiske områder. For 2100 er øgningen i maksimalt grundvandspejlet beregnet til at være op til det dobbelte af tallet for 2050.



Figur 16. Effekt af klimaændringer på det maksimale niveau af det terrænnære grundvandsspejl af klimaændringer. Kortet til venstre viser effekten af en havspejlsstigning på 1m, mens kortet til højre viser effekten af ændret nedbør og fordampning i et klimascenarie for 2050. Beregningerne er lavet med Jeppes model. Figur fra Eriksen (2019).

Resultaterne fra JCR-modellens beregninger er vist i Tabel 6 for syv udvalgte boringer. Her ses, at scenariet med størst sandsynlighed (median klimamodel) giver en øgning i max grundvandsspejl på op til 16 cm, mens worst case scenariet (våd klimamodel) giver øgninger på 20-24 cm i området omkring Ægirsvej. Scenariet med den våde klimamodel giver tal, der svarer rimeligt godt til Jeppes beregninger som worst case, hvilket er et udtryk for, at de to modeller giver sammenlignelige resultater.

Tabel 6. Effekt på det maksimale niveau af det terrænnære grundvandsspejl af klimaændringer i 2050. Beregningerne er lavet med JCR modellen.

Effekt af klimaændring (cm)	B10-1	B14-1	Æ5-1	V50-3	H29-2	DSV130	ST44-1
Tør klimamodel (<10% sandsynlighed)	-16	-11	-14	-6	-8	-8	-9
Median klimamodel (størst sandsynlighed)	**16**	**10**	**14**	**6**	**7**	**8**	**6**
Våd klimamodel (<10% sandsynlighed)	20	24	22	16	19	22	13

8. Referencer

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 pp.

Henriksen HJ, Højberg AL, Olsen M, Seaby LP, van der Keur P, Stisen S, Troldborg L, Sonnenborg TO, Refsgaard JC (2012) Klimaeffekter på hydrologi og grundvand – Klimagrundvandskort. GEUS Rapport 2012/116

Naturstyrelsen (2016). Lejre Vest, Osted og Roskilde - hydrologisk model, Rapport. Udarbejdet af Rambøll.

Pasten-Zapata E, Sonnenborg TO, Refsgaard JC (2019) Climate change: Sources of uncertainty in precipitation and temperature projections for Denmark. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 43, e2019430102. https://doi.org/10.34194/GEUSB-201943-01-02

Rambøll (2016) Udvidelse og opdatering af model, samt kontrol af model. Bistand i forbindelse med indvindingstilladelser. Notat udarbejdet af Rambøll for Roskilde Kommune 2016.07.08, 30 sider.

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.

Refsgaard JC, Troldborg L, Henriksen HJ, Højberg AL, Møller RR, Nielsen AM (2010) God praksis i hydrologisk modellering. Geo-Vejledning 7. 56 pp plus appendices. GEUS. http://gk.geus.info/xpdf/geovejl7_god_praksis_i_hydrologisk_modellering_m_app_20100531_net.pdf

Seaby LP (2013) Uncertainty in hydrological change modelling. PhD Thesis. GEUS Rapport 2013/58.

Seifert D, Sonnenborg TO, Refsgaard JC, Højberg AL, 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

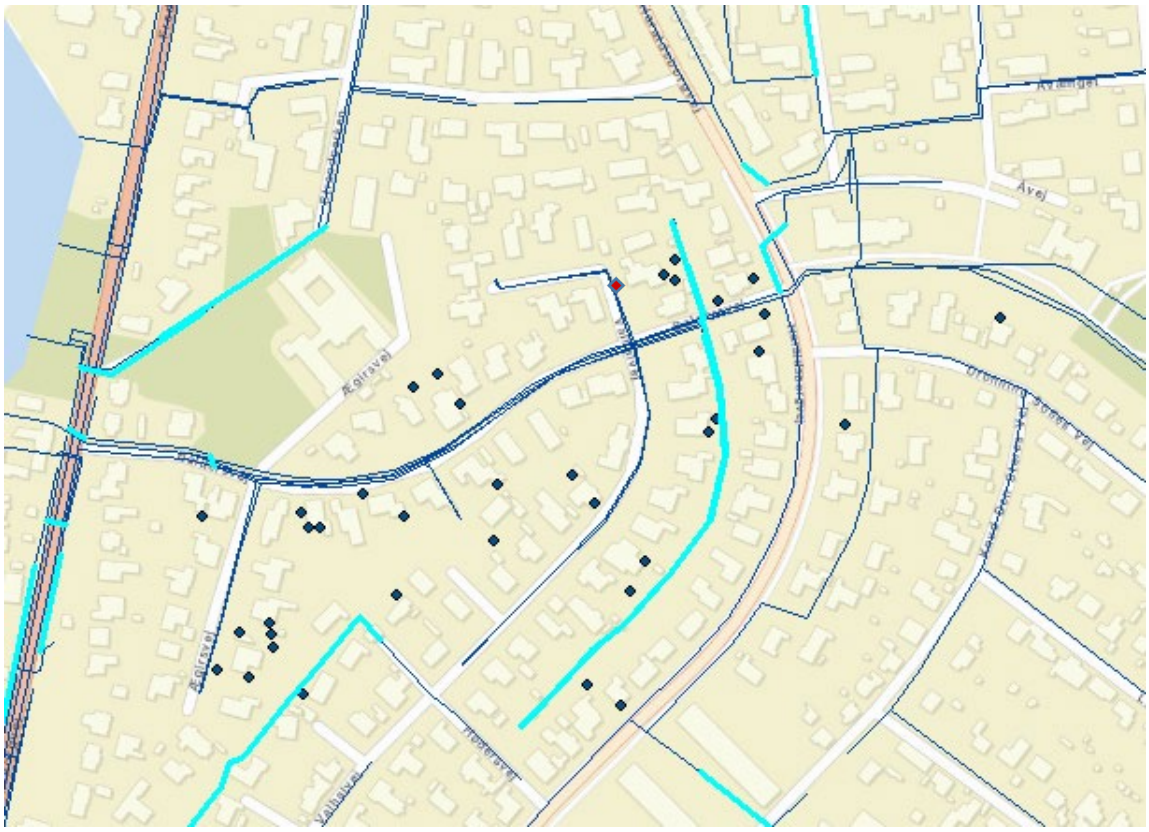
Sonnenborg TO, Seifert D, Refsgaard JC (2015) Climate model uncertainty vs. conceptual geological uncertainty in hydrological modelling. Hydrology and Earth System Sciences, 19, 3891-3901. http://dx.doi.org/10.5194/hess-19-3891-2015

Vejen F, Villic K, Jensen H (2014) Korrigeret Nedbør 1989-2010, 2011-2012 & 2013. Databeskrivelse og resultater. Danmarks Meteorologiske Institut. DMI Technical Report 14-13.

Bilag A: Vandgruppens pejlinger

A.1 Netværk af boringer

Vandgruppen har pejlet grundvandsstand i 40 boringer fordelt på 20 grundejere. Boringernes placering er vist på Figur A.1.



Figur A.1. Placering af 37 af de 40 pejleboringer. De blå streger viser placering af Fors' spildevands- og regnvandsledninger. Boringen på Baldersvej 26 er ikke indmålt. De to sidste boringer er placeret på Strandgårdsvej 44, 600 m nord for kortets øverste rand, og fungerer som referenceboringer, idet de ligger udenfor det område, der påvirkes af oppumpningen fra Haraldsborg Vandværk.

Boringerne er lavet ved hjælp at et pælebor og et 3 m håndbor. Boringerne er mellem 118 og 265 cm dybe – mange af dem mellem 170 cm og 200 cm. Alle boringerne (med undtagelse af Æ5-1) er filtersat med 50 mm filterrør fra Rotek og efterfyldt med filtersand langs filteret. Boring Æ5-1 adskiller sig fra de andre, fordi der er installeret en automatisk logger til kontinuert måling af grundvandsstand. Denne boring har benyttet et 100 mm filterrør. Se mere information i afsnit A.4.

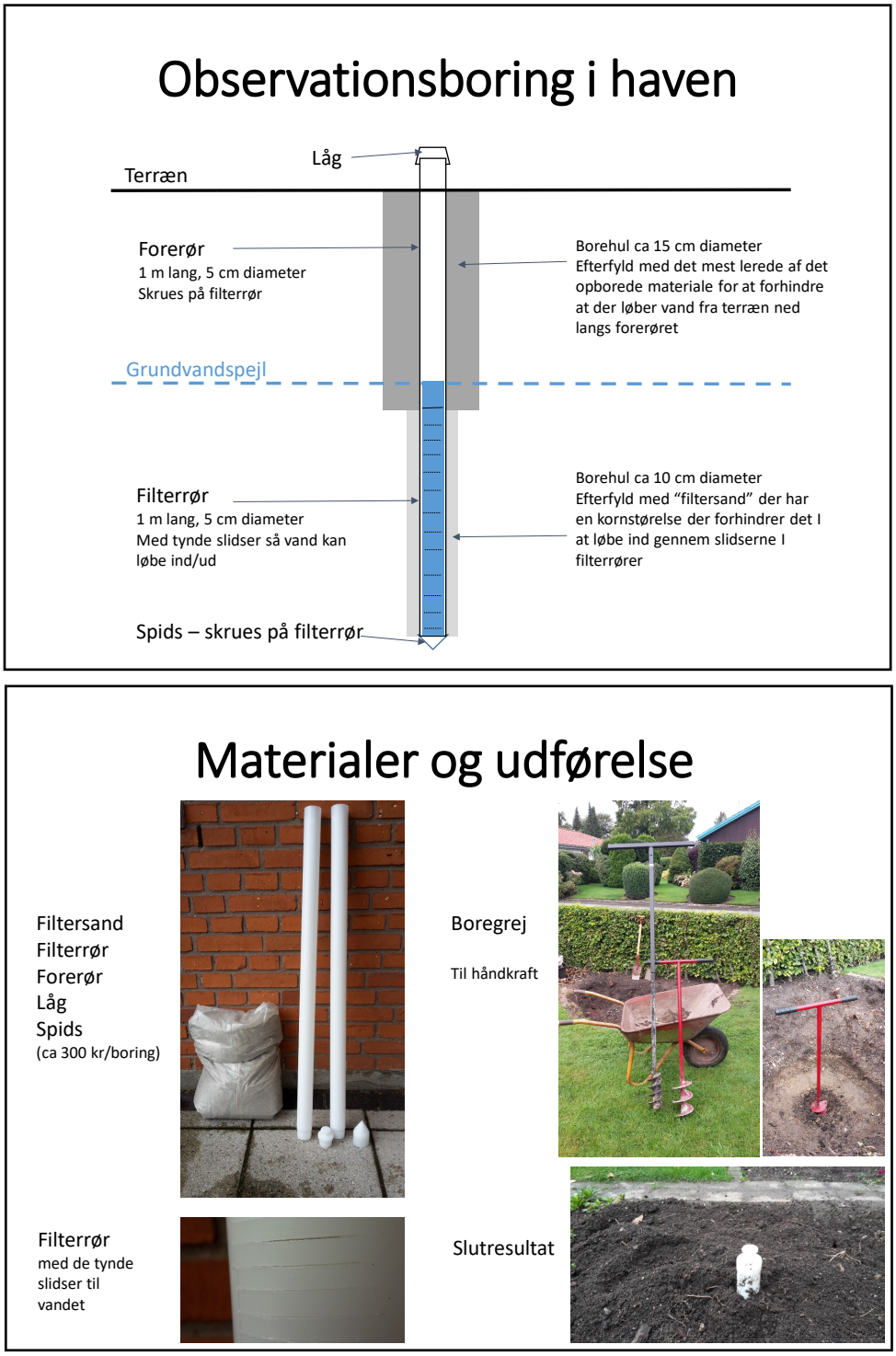
Tabel A.1 indeholder informationer om adresse, koordinater og afstand til nærmeste rør for samtlige boringer. Hovedparten af boringerne er blevet indmålt med GPS af Karl Vederhus, Fors. For tre boringers vedkommende (V50-4, ST44-1, ST44-2) er koordinaterne fundet ved hjælp af Google Earth suppleret med vaterpas, mens B26, hvor der kun er fem observationer, ikke er blevet indmålt.

Tabel A.1. Borings-ID, adresser og koordinater samt afstanden til nærmeste drænende rør for de 40 boringer.

Boring		Koordinater				Afstand til rør	
Borings-ID	**Adresse**	**Koordinator fra**	**Northing**	**Easting**	**Kote (m)**	**Nærmeste rør**	**Afstand (m)**
B10-1	Baldersvej 10	Fors-GPS	6.171.808,75928	694.311,83720	5,48	Fors	26
B10-2	Baldersvej 10	Fors-GPS	6.171.808,95298	694.305,57058	5,42	Fors	23
B10-3	Baldersvej 10	Fors-GPS	6.171.817,89916	694.300,74820	4,76	Fors	11
B13-1	Baldersvej 13	Fors-GPS	6.171.878,58238	694.391,27875	8,91	Fors	16
B13-2	Baldersvej 13	Fors-GPS	6.171.896,31150	694.378,49790	10,07	Fors	31
B13-3	Baldersvej 13	Fors-GPS	6.171.888,84891	694.364,83313	10,10	Fors	31
B14-1	Baldersvej 14	Fors-GPS	6.171.828,22085	694.336,08858	5,93	Om.dræn	3
B14-2	Baldersvej 14	Fors-GPS	6.171.816,06007	694.359,47150	5,92	Om.dræn	8
B26	Baldersvej 26	Ikke målt					
B30	Baldersvej 30	Fors-GPS	6.171.930,11830	694.563,40111	8,78	Fors	8
Æ2	Ægirsvej 2	Fors-GPS	6.171.815,20342	694.245,06069	5,26	Fors/Om.dræn	12
Æ5-1	Ægirsvej 5	Fors-GPS	6.171.754,76013	694.282,98456	6,67	Fors	25
Æ5-2	Ægirsvej 5	Fors-GPS	6.171.749,06102	694.284,52401	6,70	Fors	15
Æ5-3	Ægirsvej 5	Fors-GPS	6.171.749,70884	694.266,41634	6,36	Fors	10
Æ7-1	Ægirsvej 7	Fors-GPS	6.171.741,89865	694.285,11447	6,90	Om.dræn	7
Æ7-2	Ægirsvej 7	Fors-GPS	6.171.724,36639	694.271,32584	6,68	Om.dræn	7
Æ7-3	Ægirsvej 7	Fors-GPS	6.171.728,29393	694.253,32547	6,70	Fors	2
V32-1	Valhalvej 32	Fors-GPS	6.171.772,83300	694.487,48419	8,69	Fors	9
V32-2	Valhalvej 32	Fors-GPS	6.171.790,55781	694.495,41672	8,70	Fors	15
V40-1	Valhalvej 40	Fors-GPS	6.171.862,94612	694.531,49286	8,62	Fors	9
V40-2	Valhalvej 40	Fors-GPS	6.171.870,99074	694.536,33372	8,72	Fors	2
V41	Valhalvej 41	Fors-GPS	6.171.714,56728	694.301,65671	10,58	Fors	3
V49	Valhalvej 49	Fors-GPS	6.171.771,21662	694.354,71050	10,89	Om.dræn	4
V50-1	Valhalvej 50	Fors-GPS	6.171.960,53376	694.513,01539	7,09	Fors	3
V50-2	Valhalvej 50	Fors-GPS	6.171.952,57668	694.506,78249	7,06	Om.dræn	2
V50-3	Valhalvej 50	Fors-GPS	6.171.948,40671	694.512,99151	7,10	Fors	4
V50-4	Valhalvej 50	JCR-Google Earth	55.654354°	12.091337°	7,62	Fors	3
V61-1	Valhalvej 61	Fors-GPS	6.171.833,21228	694.412,33746	6,95	Fors	30
V61-2	Valhalvej 61	Fors-GPS	6.171.801,46777	694.410,17654	7,33	Fors	25
V65-1	Valhalvej 65	Fors-GPS	6.171.822,77366	694.466,88382	8,44	Fors	10
V65-2	Valhalvej 65	Fors-GPS	6.171.838,67270	694.454,63897	8,48	Fors	25
H29-1	Haraldsborgvej 29	Fors-GPS	6.171.708,16963	694.482,30119	15,49	Fors	5
H29-2	Haraldsborgvej 29	Fors-GPS	6.171.720,24216	694.462,70686	14,27	Fors	9
H51	Haraldsborgvej 51	Fors-GPS	6.171.908,39612	694.560,18016	8,38	Dræn/kælder	3
H53-1	Haraldsborgvej 53	Fors-GPS	6.171.949,97357	694.557,26953	8,07	Fors	11
H53-2	Haraldsborgvej 53	Fors-GPS	6.171.937,76799	694.536,52549	7,39	Fors	8
H72	Haraldsborgvej 72	Fors-GPS	6.171.867,85749	694.608,87000	10,22	Fors	16
DSV130	Dr. Sofies vej 130	Fors-GPS	6.171.927,51858	694.696,74851	12,00	Om.dræn	2
ST44-1	Strandgårdsvej 44	JCR-Google Earth	55.660396°	12.090608°	20,00	Fors	3
ST44-2	Strandgårdsvej 44	JCR-Google Earth	55.660219°	12.090742°	20,25	Fors	6

A.2 Udførelse af boringerne

Boringerne er lavet ved hjælp af vejledningen vist i Figur A.2. Materialer er købt hos Rotek i Ishøj.



Figur A.2. Vejledning i udførelse af boringerne.

A.3 Observationer

Vandgruppens vejledning i at måle grundvandsstand er vist i Figur A.3

Figur A.3. Vejledning i måling af grundvandsstand.

I praksis har forskellige grundejere fundet forskellige måder til målingerne. Nogle har anvendt observationspinde, mens andre har monteret forskellige former for flydere. Nogle har korrigeret målingerne for den fortrængte væskemængde som anbefalet i Figur A.3, mens andre ikke har. Korrektionen udgør typisk et par cm.

Hyppigheden af målinger varierer fra daglige målinger i nogle få boringer til regelmæssige (1-2 gange per uge) i mange boringer og få målinger i nogle boringer. Mange boringer har været tørre om sommeren, hvilket har været noteret som '>xxx', hvor xxx er boringens dybde under terræn.

Observationerne er blevet indberettet i et excel ark i google docs som Vandgruppen har administreret med et nyt ark for hver måned.

A.4 Automatisk registrering i boring Æ5-1

I boring Æ5-1 har grundejeren, P.S. Ramanujam, installeret en ultralydssonde, der kan måle dybden til vandstanden i boringen. Måleenheden er forbundet til husets wifi, og der bliver gemt data for hver time. For at få udstyret til at fungere var det nødvendigt at benytte et 100 mm rør.

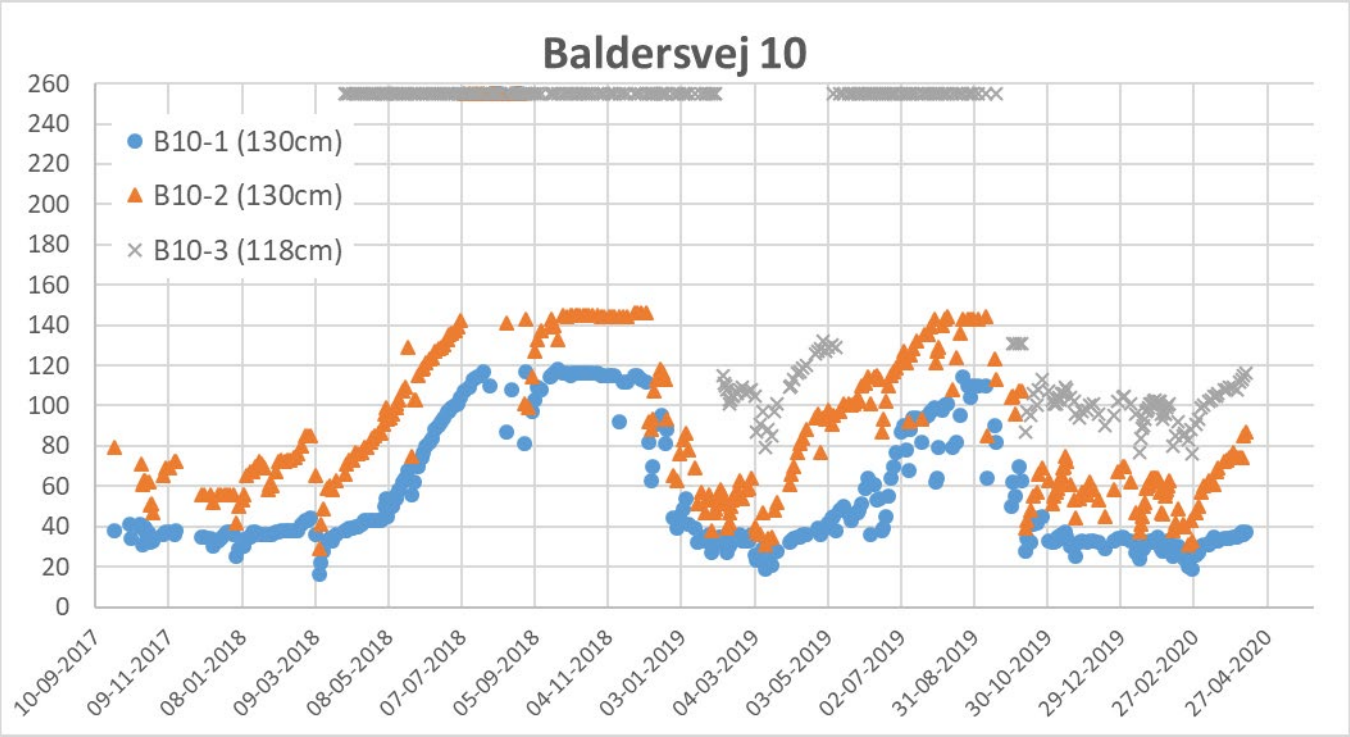
A.5 Kvalitetssikring af data

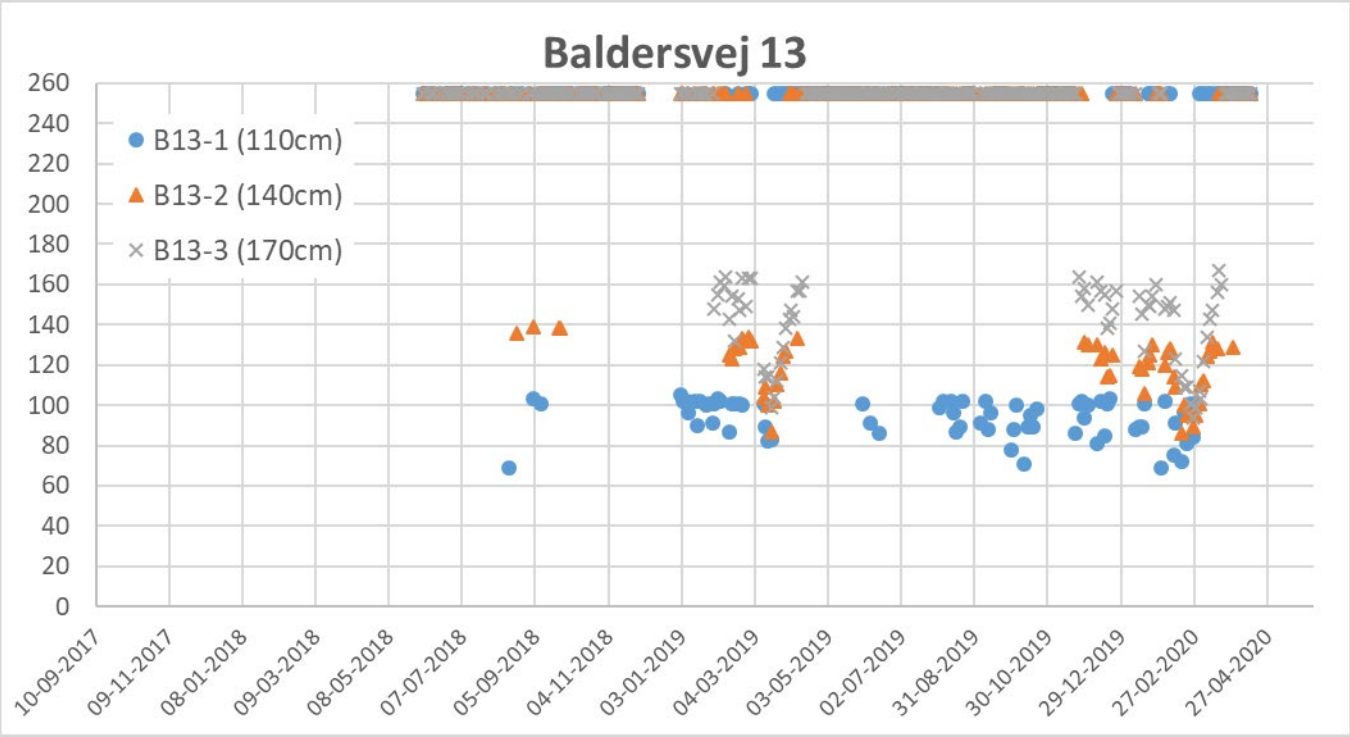
Alle data er samlet i et enkelt excel ark og tidsserierne fra de enkelte boringer er plottet og sammenlignet. I den forbindelse er der lavet følgende ændringer af de indrapporterede data:

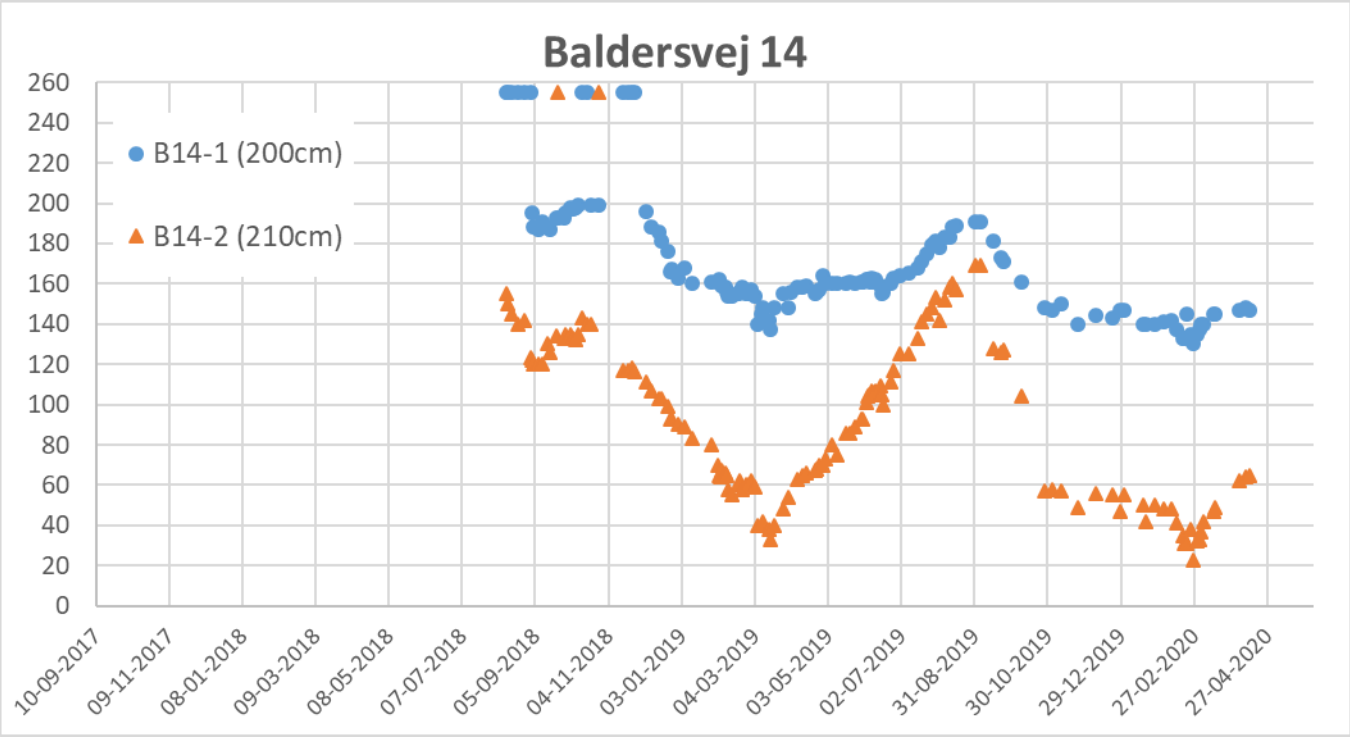
- Data angivet med ’>xxx’ svarende til ’tør’ er ændret til værdien ’255’. Herved er det muligt at plotte data fra alle boringer på en ensartet måde.
- Data, som ser ud til at svare til en tør boring (typisk hvis vandstanden i boringen < 10 cm), er tildelt værdien 255.
- Åbenlyse fejl er rettet eller data er slettet, fx ved manglende ciffer eller data fra en enkelt dag forskubbet en kolonne.
- Data fra juli 2018 er slettet for en del boringer. Der er mystiske og helt åbenlyse fejl i højre halvdel af google drive excel arket for den måned.

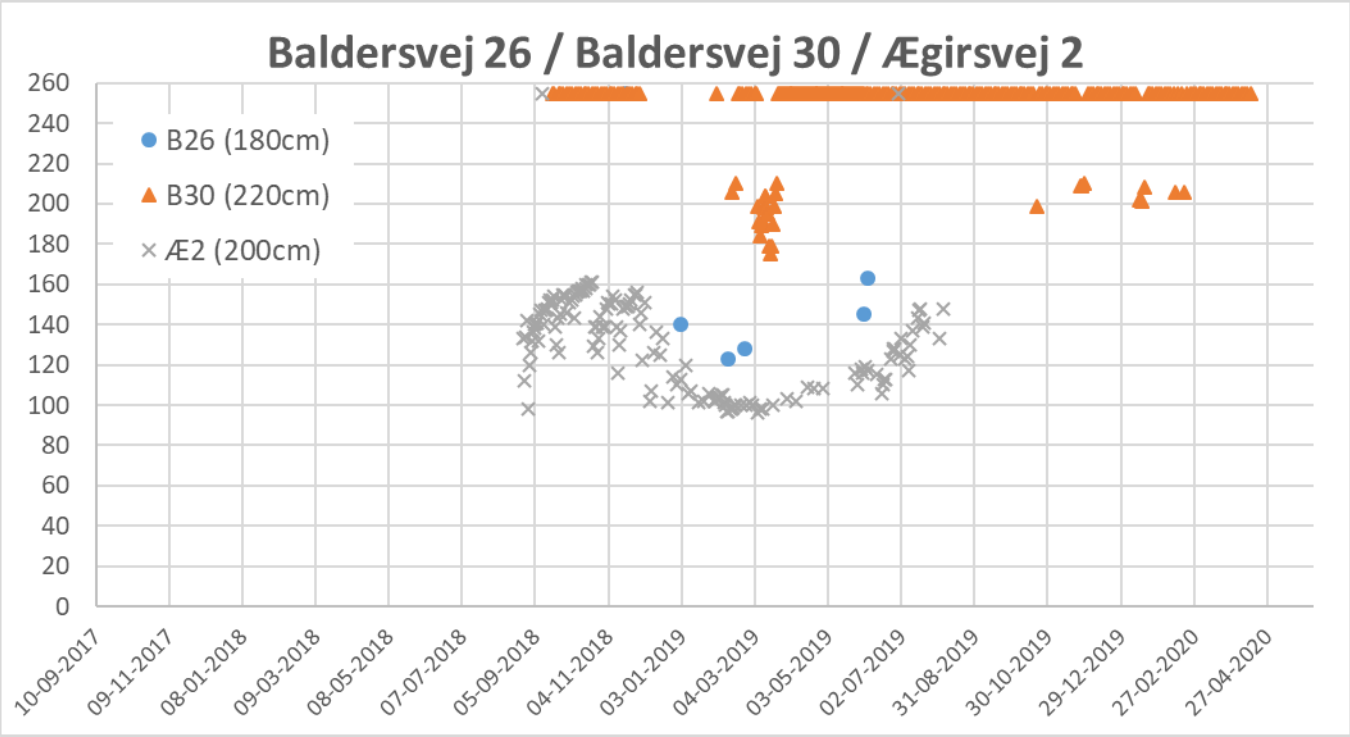
A.6 Plot af data

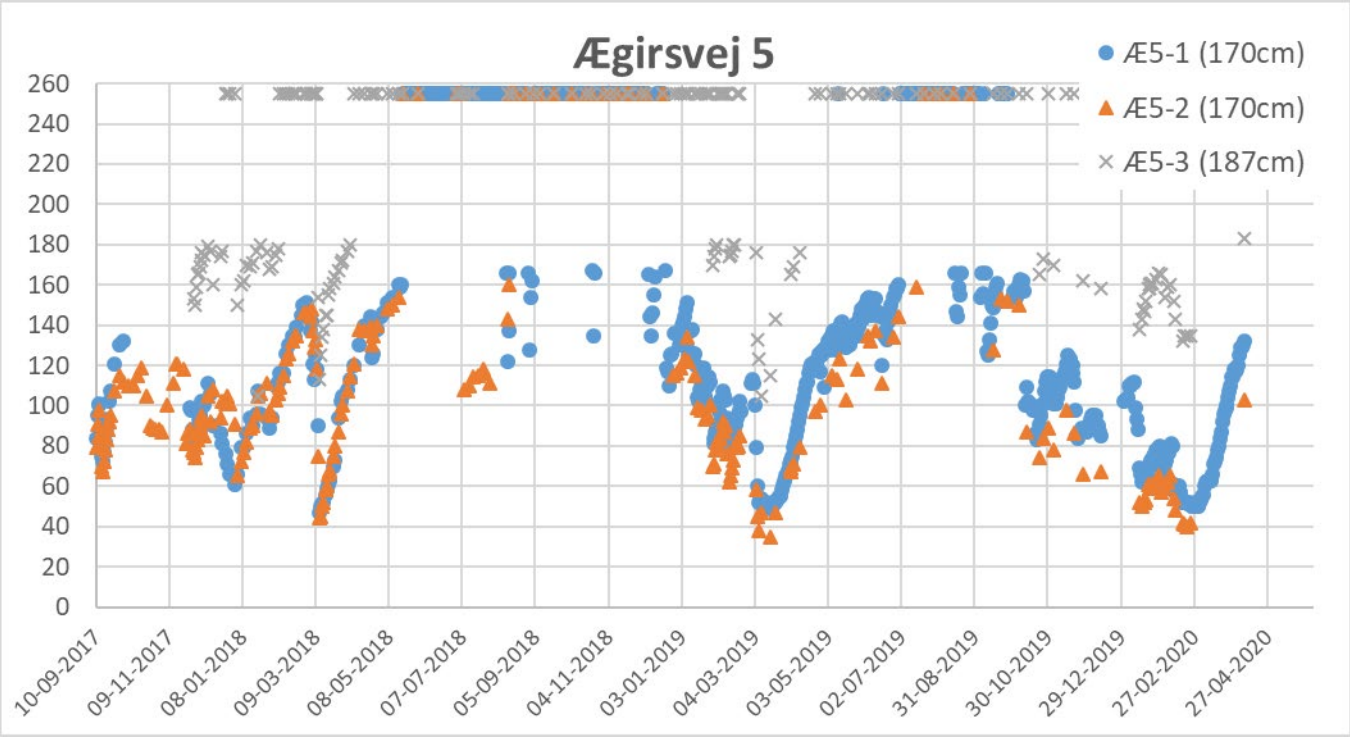
Figurerne på de følgende sider viser tidsserieplots fra alle 40 boringer i samme rækkefølge som i Tabel A.1. Figurerne viser målt grundvandsstand som dybde under terræn. Bemærk at datapunkter, der viser 255 cm, svarer til at boringen er tør, dvs. at grundvandsstanden er lavere end dybden af boringen, som er vist i parentes ud for markøren efter borings-ID.

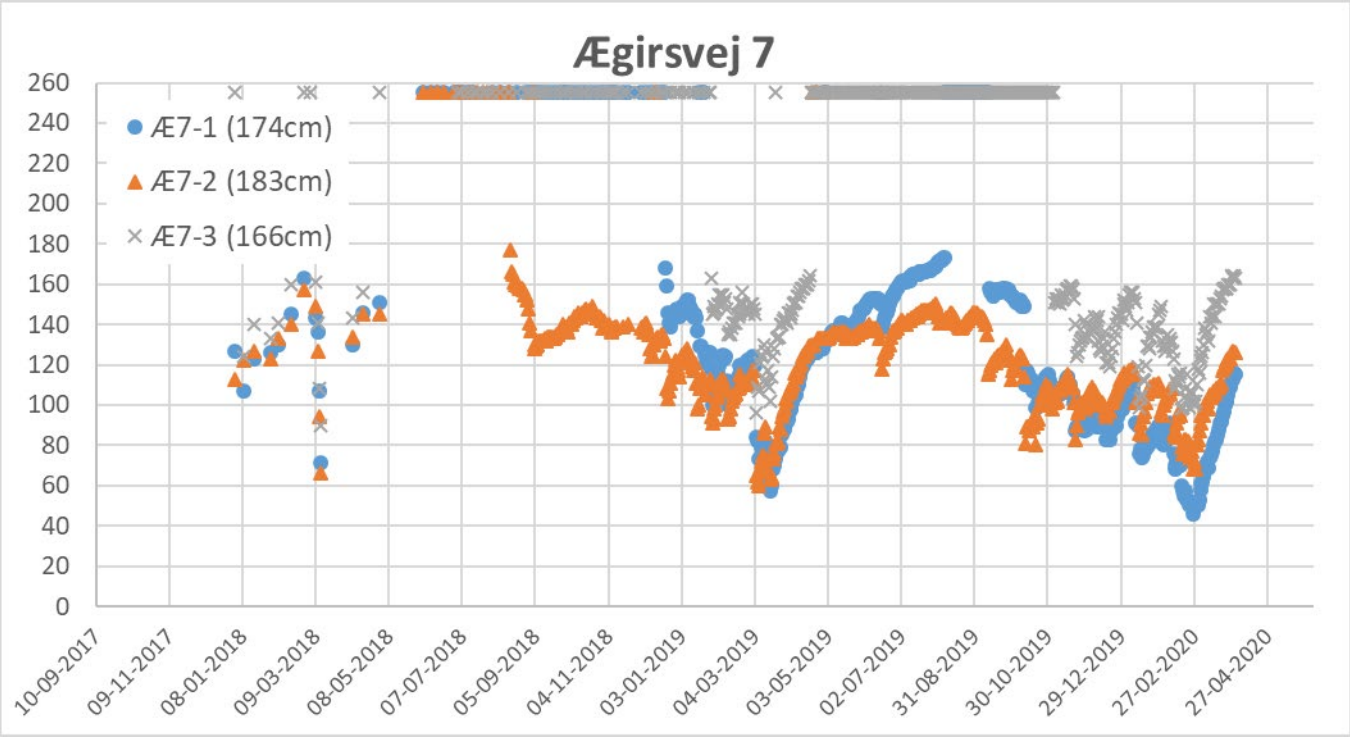

Baldersvej 10
B10-1 (130cm)
B10-2 (130cm)
B10-3 (118cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

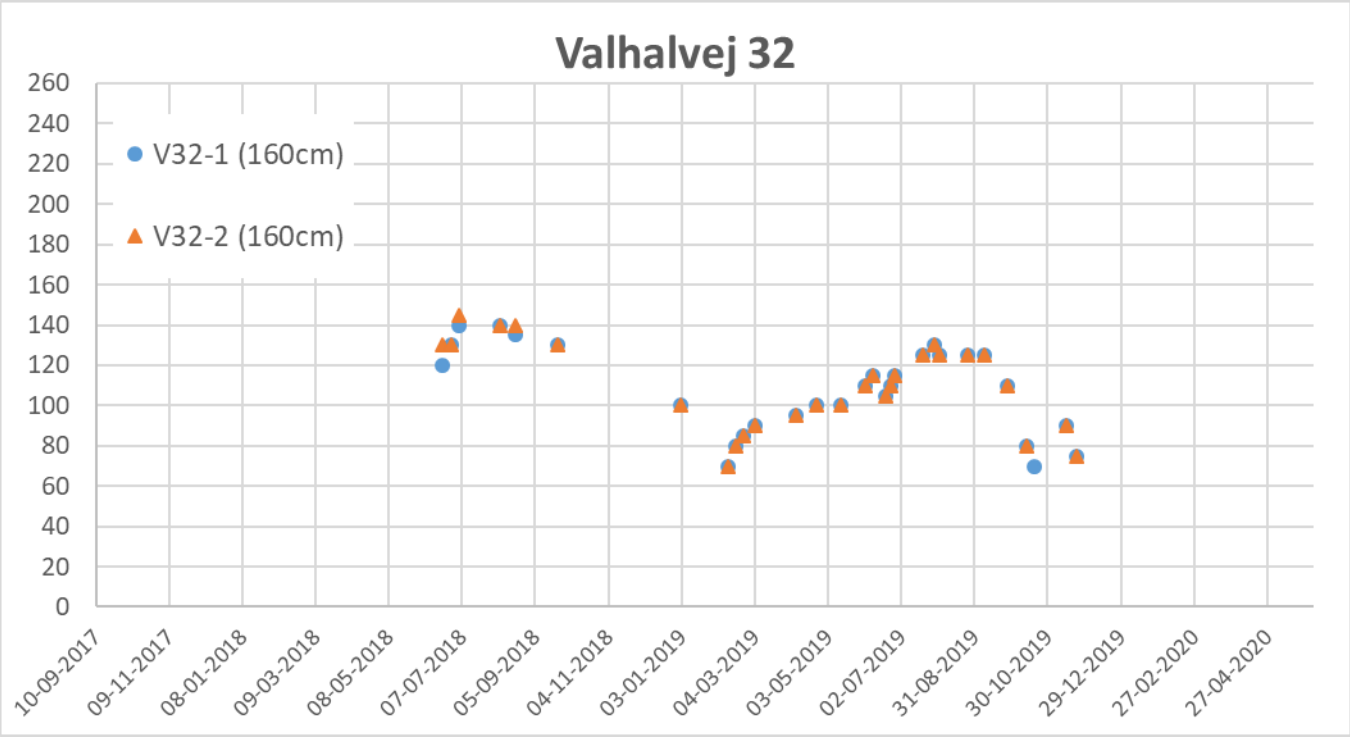

Baldersvej 13
B13-1 (110cm)
B13-2 (140cm)
B13-3 (170cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

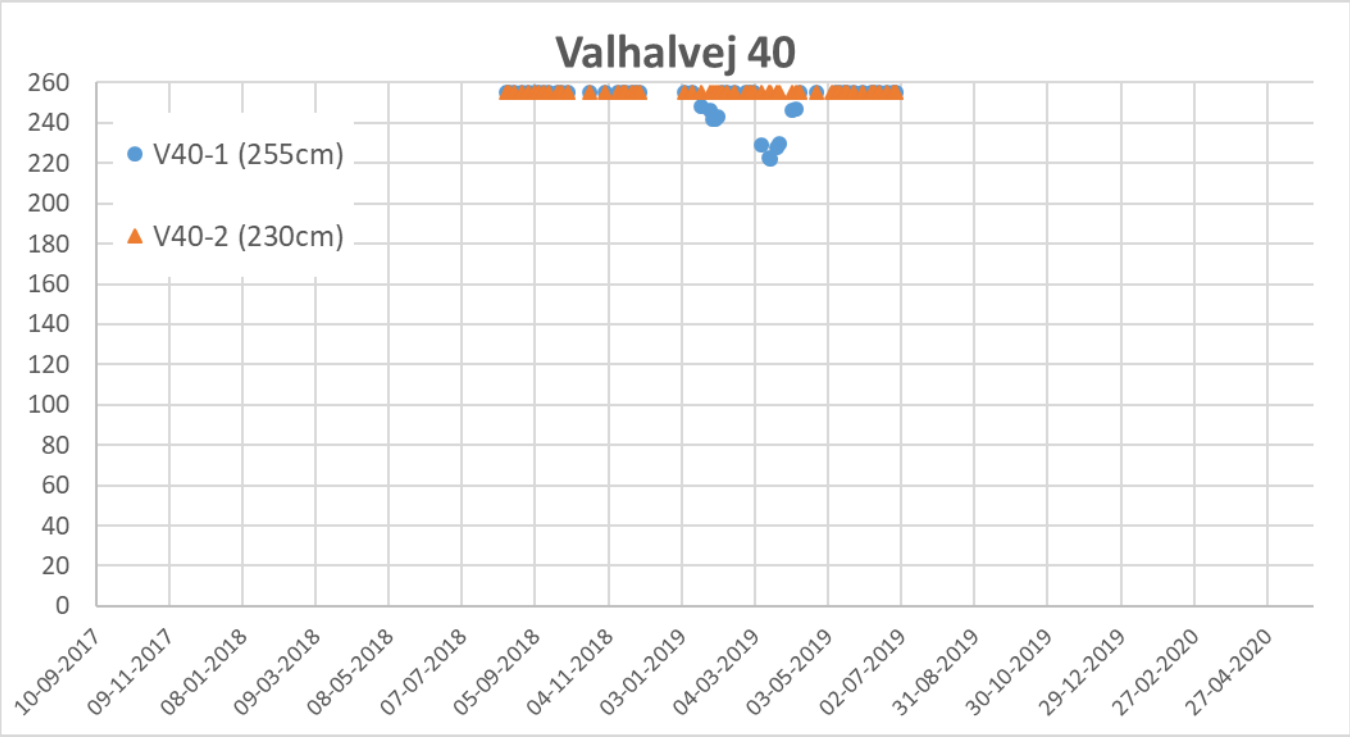

Baldersvej 14
B14-1 (200cm)
B14-2 (210cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

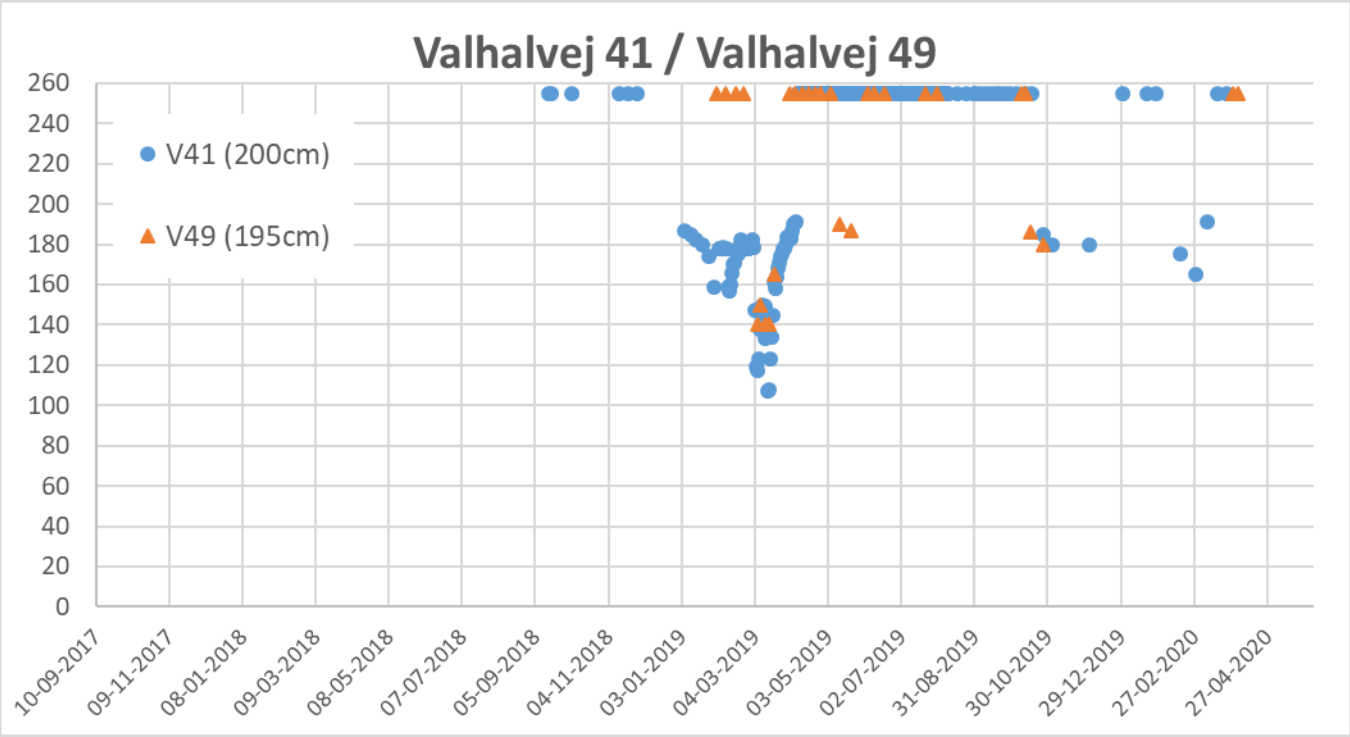

Baldersvej 26 / Baldersvej 30 / Ægirsvej 2
B26 (180cm)
B30 (220cm)
Æ2 (200cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

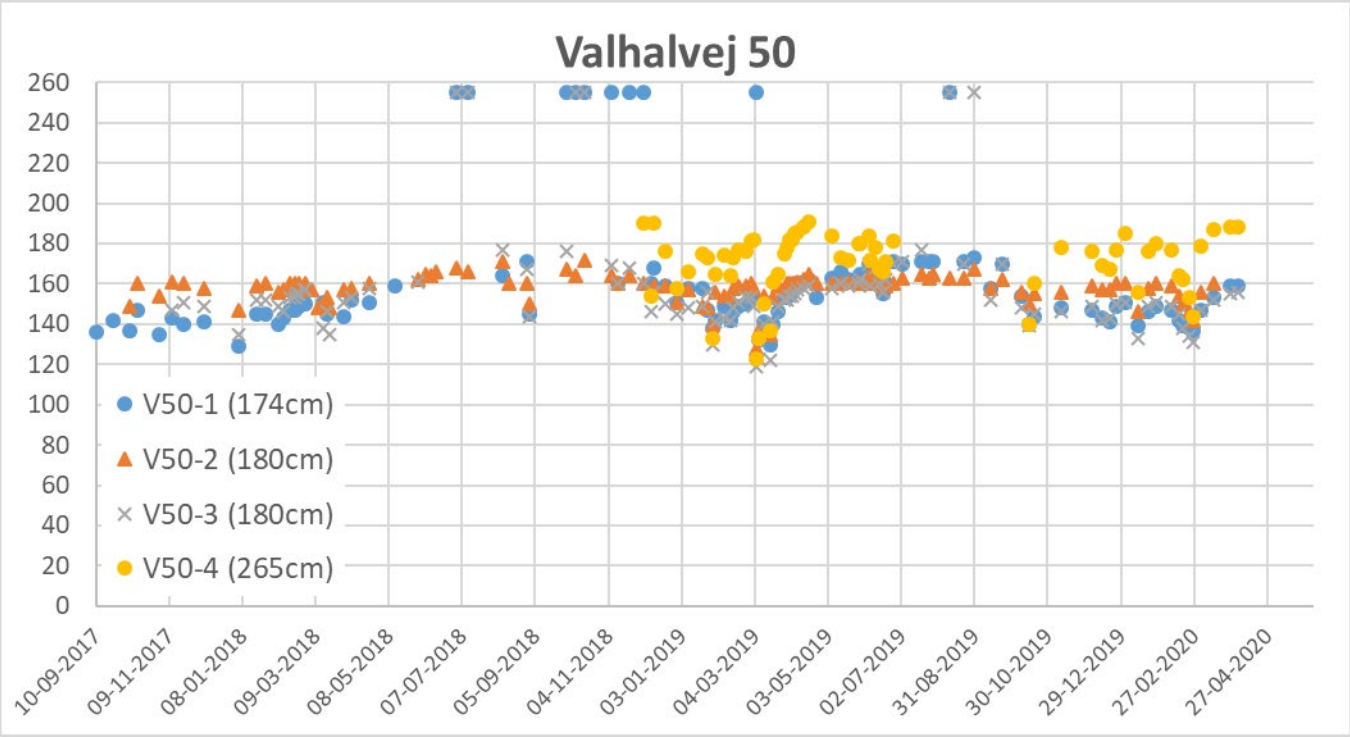

Ægirsvej 5
Æ5-1 (170cm)
Æ5-2 (170cm)
Æ5-3 (187cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

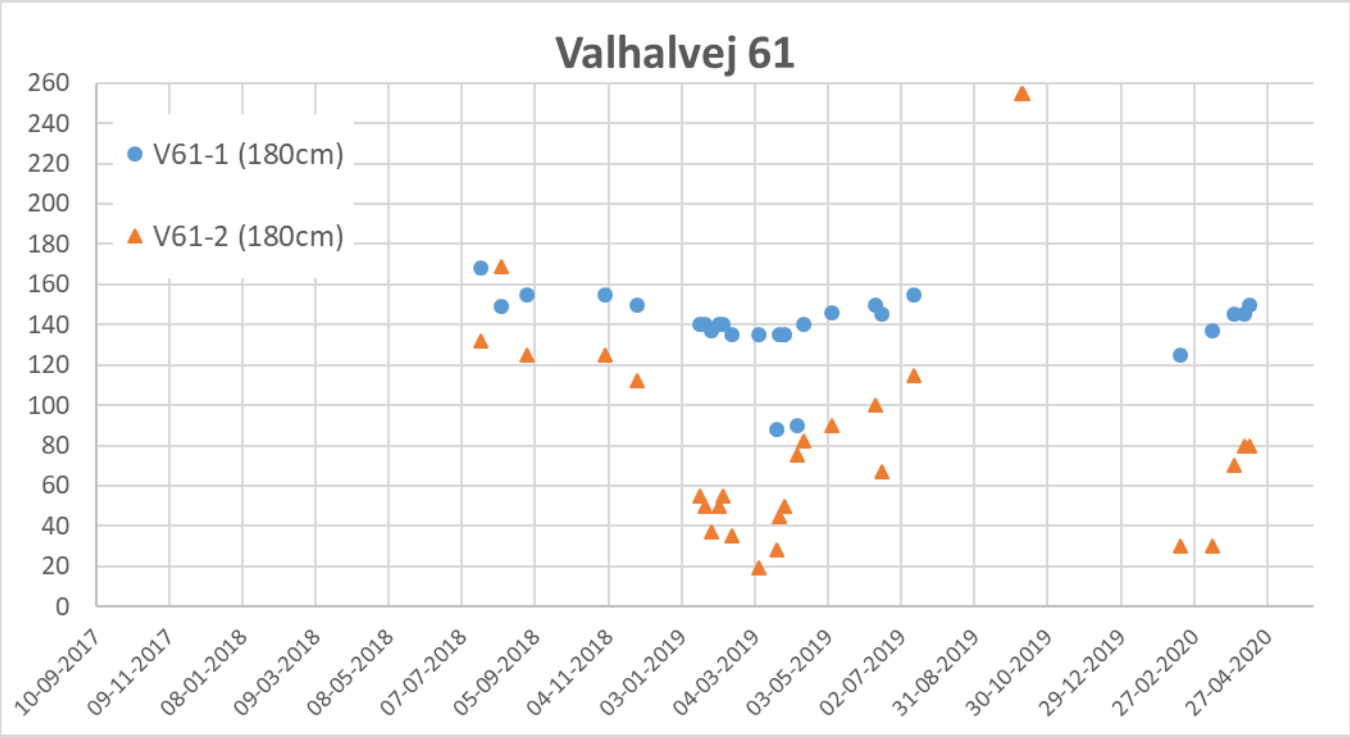

Ægirsvej 7
Æ7-1 (174cm)
Æ7-2 (183cm)
Æ7-3 (166cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

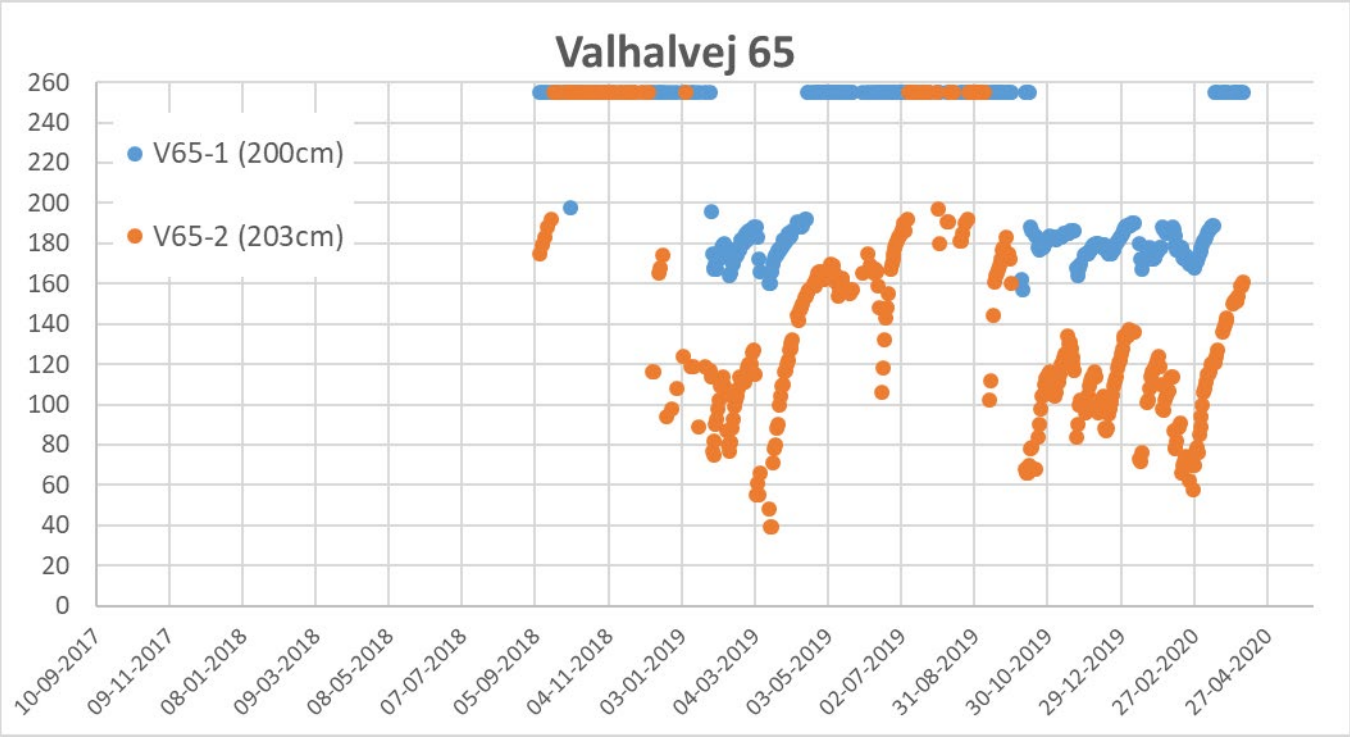

Valhalvej 32
V32-1 (160cm)
V32-2 (160cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

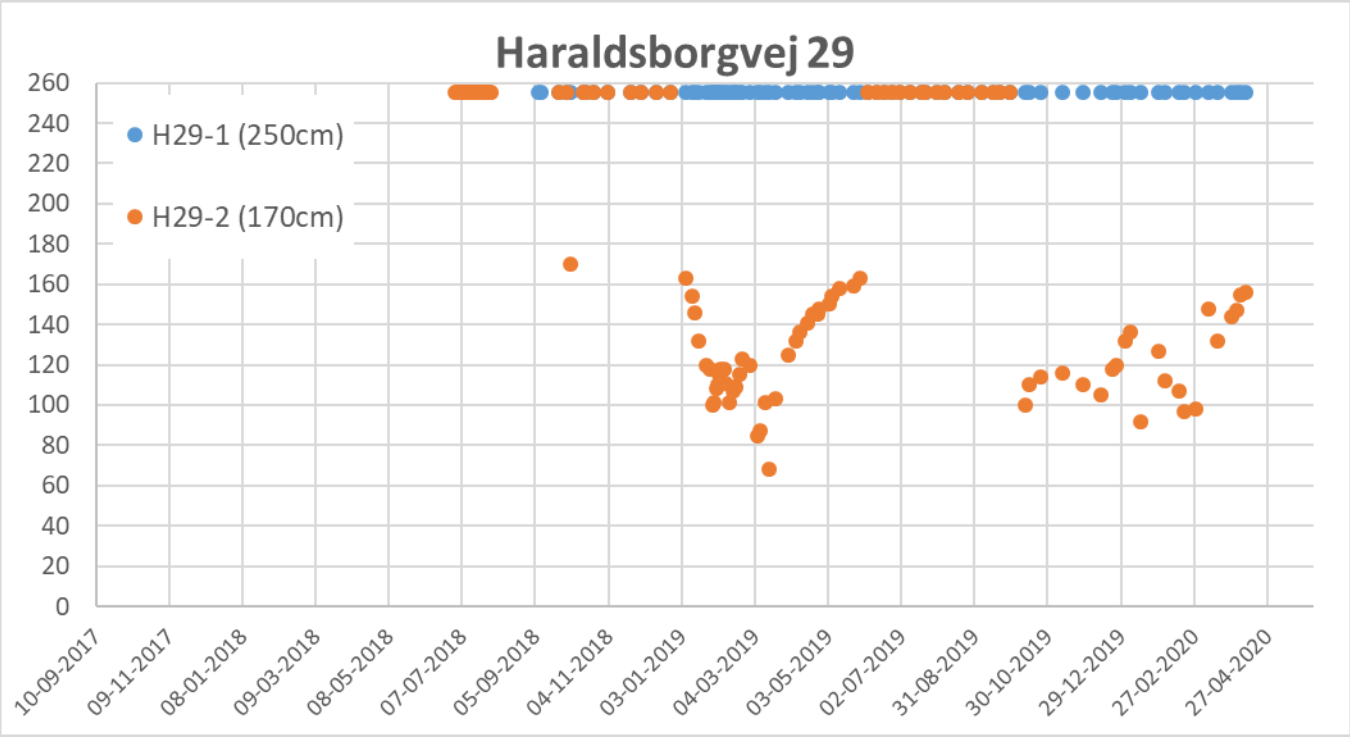

Valhalvej 40
V40-1 (255cm)
V40-2 (230cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

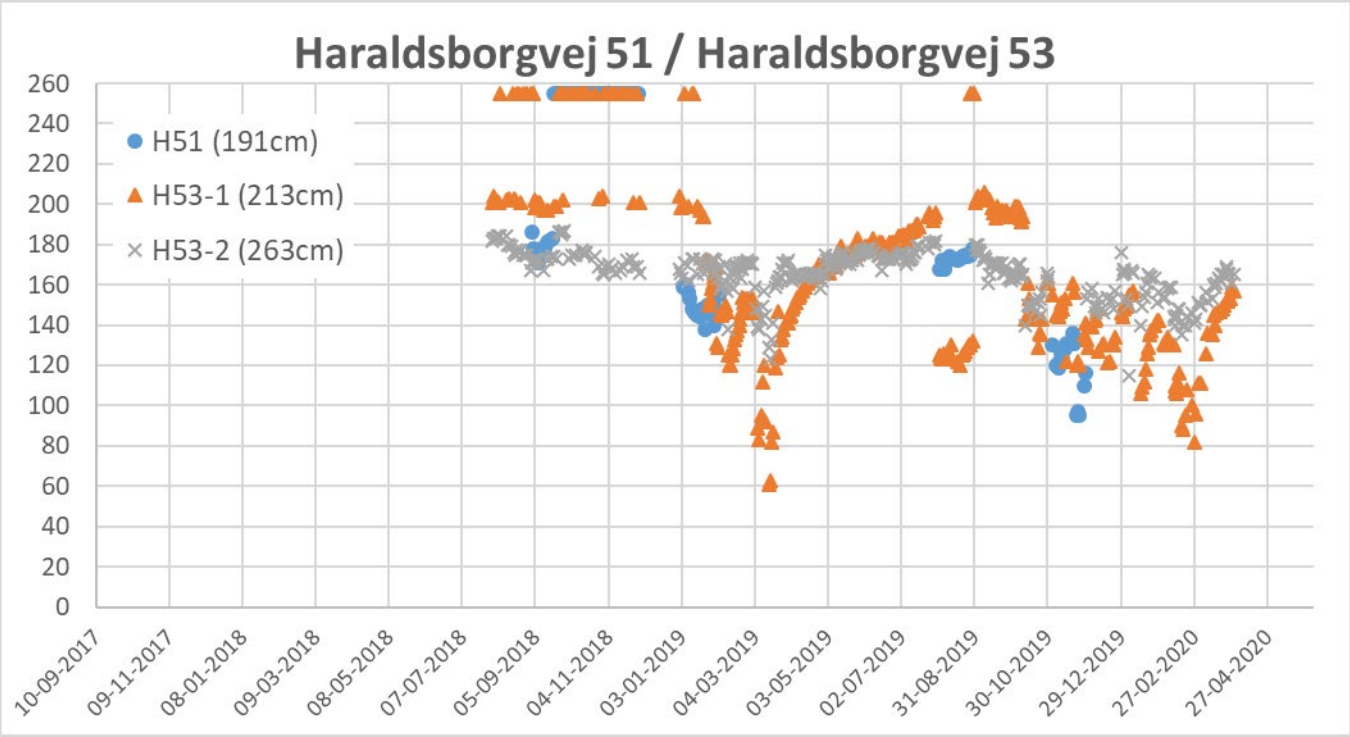

Valhalvej 41 / Valhalvej 49
V41 (200cm)
V49 (195cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

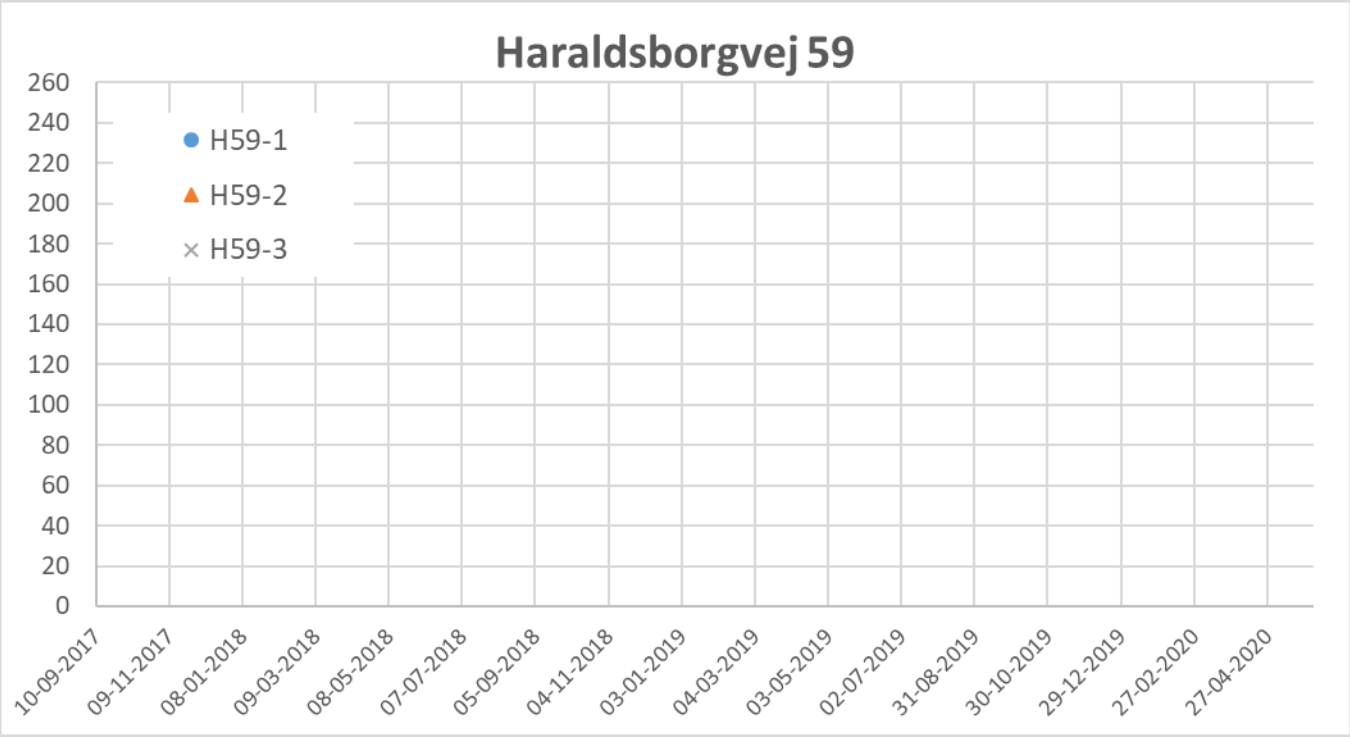

Valhalvej 50
V50-1 (174cm)
V50-2 (180cm)
V50-3 (180cm)
V50-4 (265cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

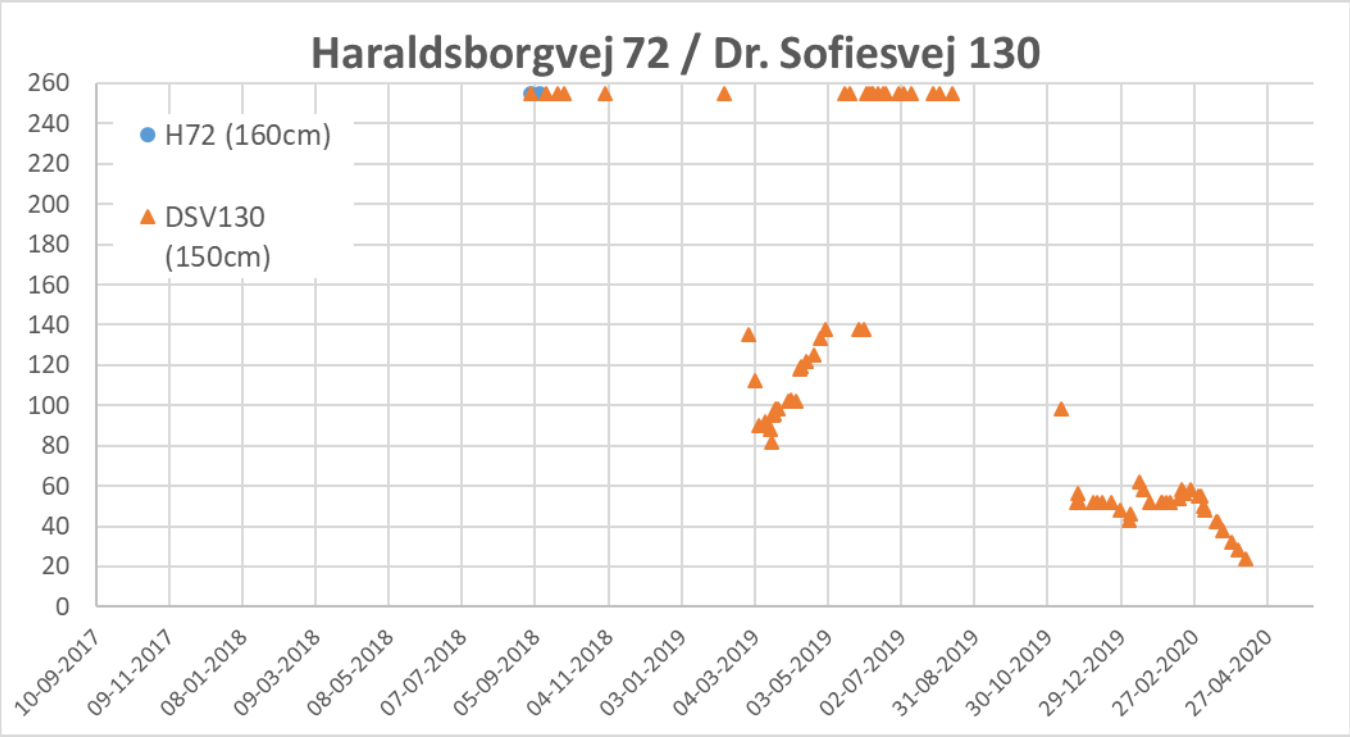

Valhalvej 61
V61-1 (180cm)
V61-2 (180cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

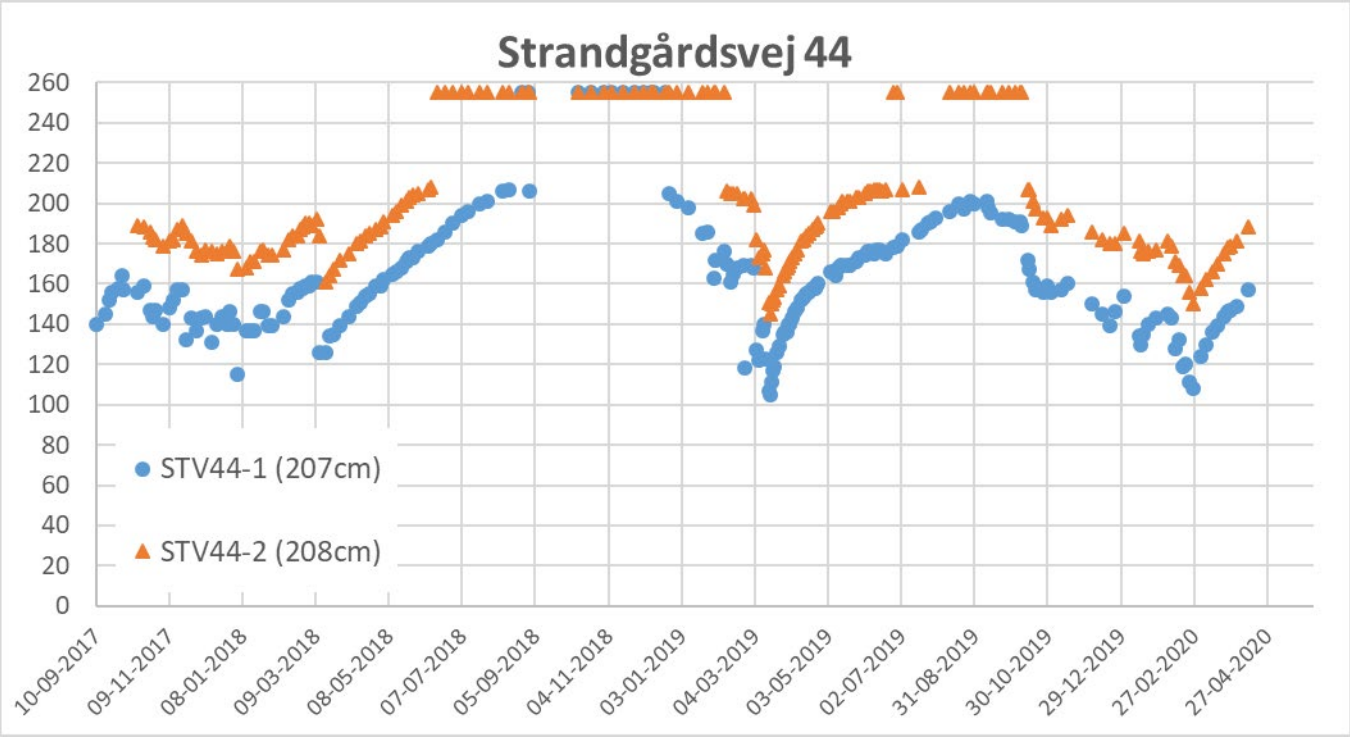

Valhalvej 65
V65-1 (200cm)
V65-2 (203cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020


Haraldsborgvej 29
H29-1 (250cm)
H29-2 (170cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020


Haraldsborgvej 51 / Haraldsborgvej 53
H51 (191cm)
H53-1 (213cm)
H53-2 (263cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

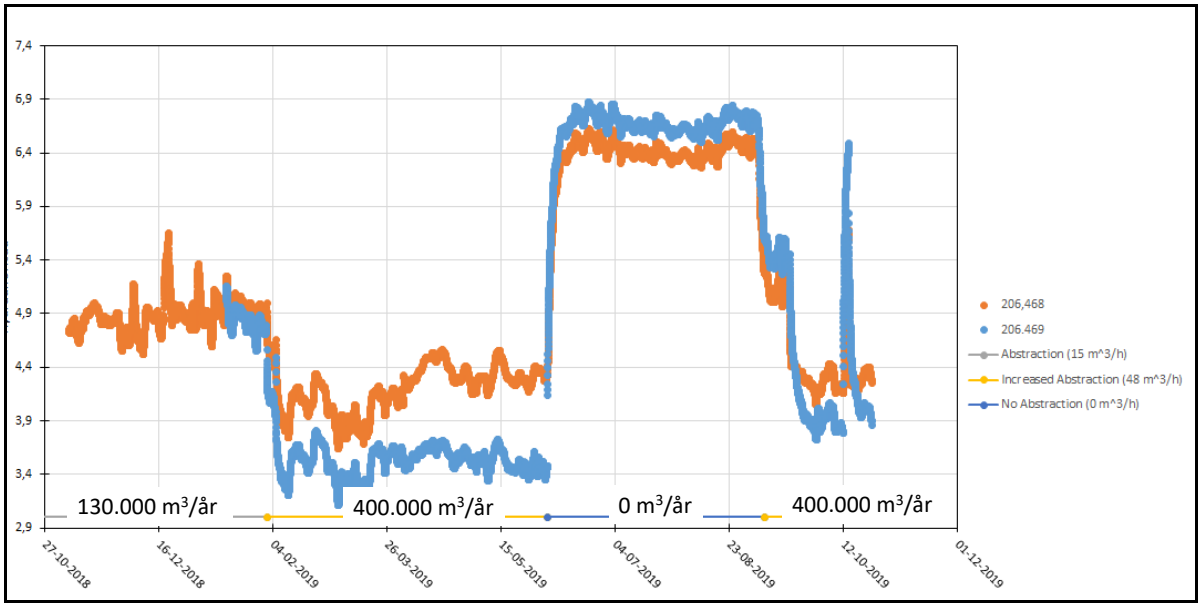

Haraldsborgvej 59
H59-1
H59-2
H59-3
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020


Haraldsborgvej 72 / Dr. Sofiesvej 130
H72 (160cm)
DSV130 (150cm)
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

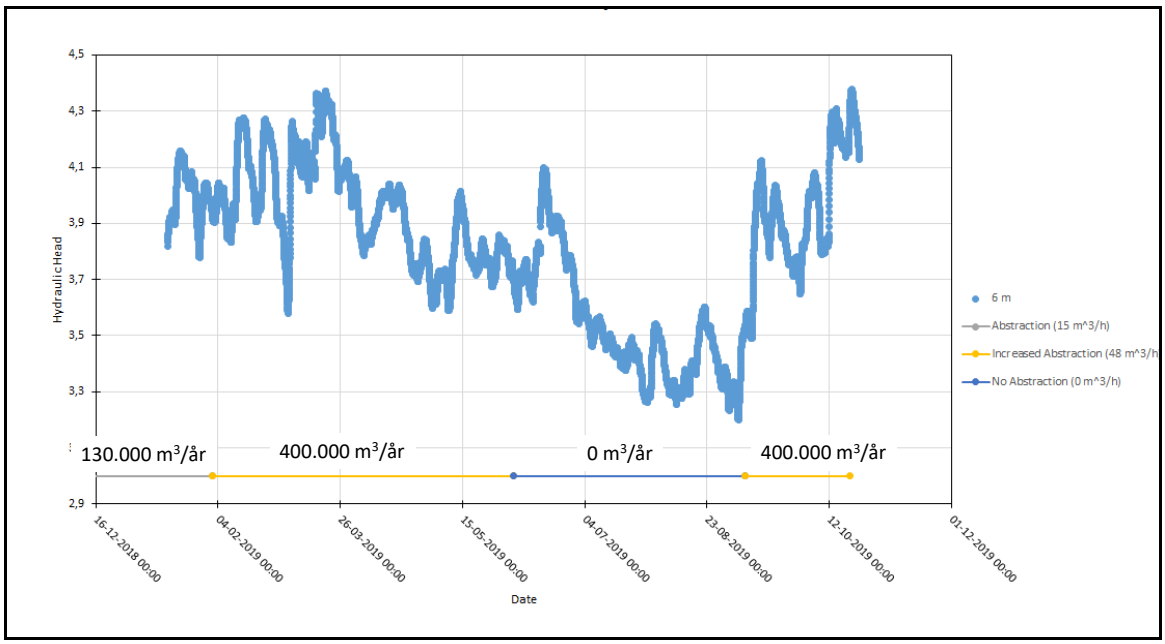

Strandgårdsvej 44
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
STV44-1 (207cm)
STV44-2 (208cm)
10-09-2017
09-11-2017
08-01-2018
09-03-2018
08-05-2018
07-07-2018
05-09-2018
04-11-2018
03-01-2019
04-03-2019
03-05-2019
02-07-2019
31-08-2019
30-10-2019
29-12-2019
27-02-2020
27-04-2020

Bilag B: Pejledata fra Fors boringer

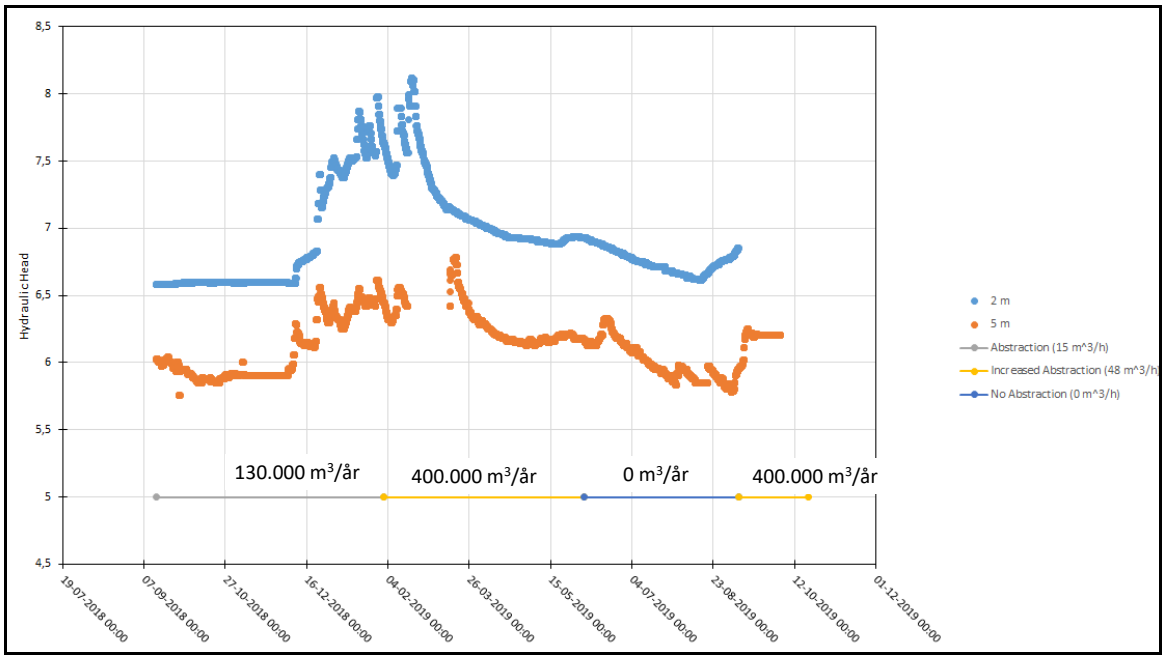
Pejledata fra de to pumpeboringer, som er filtersat i kalken, er vist i Figur B.1, mens pejledata fra terrænnære boringer er vist i Figur B.2 og B.3.



Figur B.1. Pejlinger fra de to pumpeboringer kalkboringer samt information om den variable pumperate i de to boringer tilsammen.



Figur B.2. Pejlinger fra 6 m boringen på Valhalvej 55 med information om den variable pumperate fra de to kalkboringer.

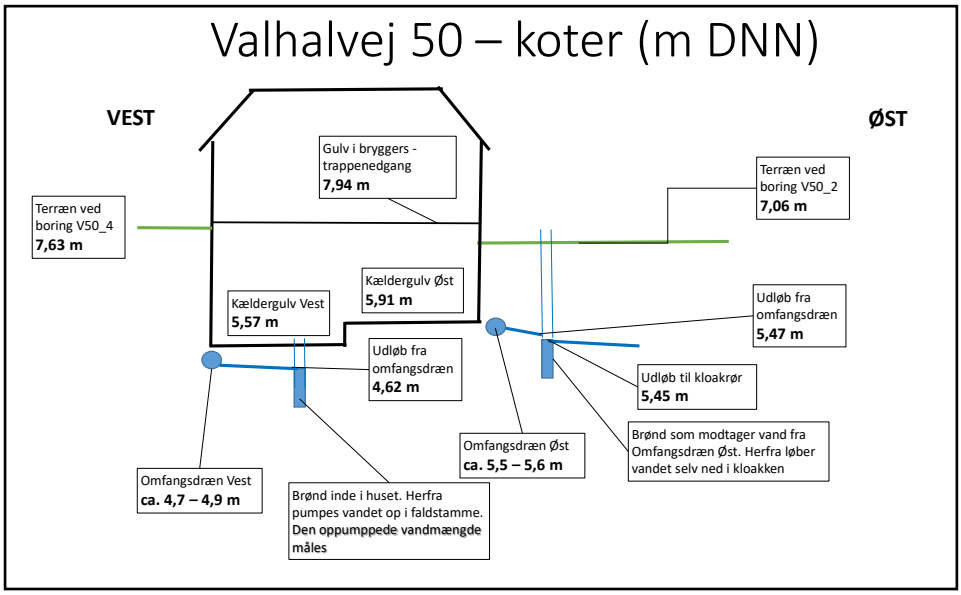


Figur B.3. Pejlinger fra 2 og 5 m boringerne på Valhalvej 55 med information om den variable pumperate fra de to kalkboringer.

Bilag C: Omfangsdræn – data fra Valhalvej 50

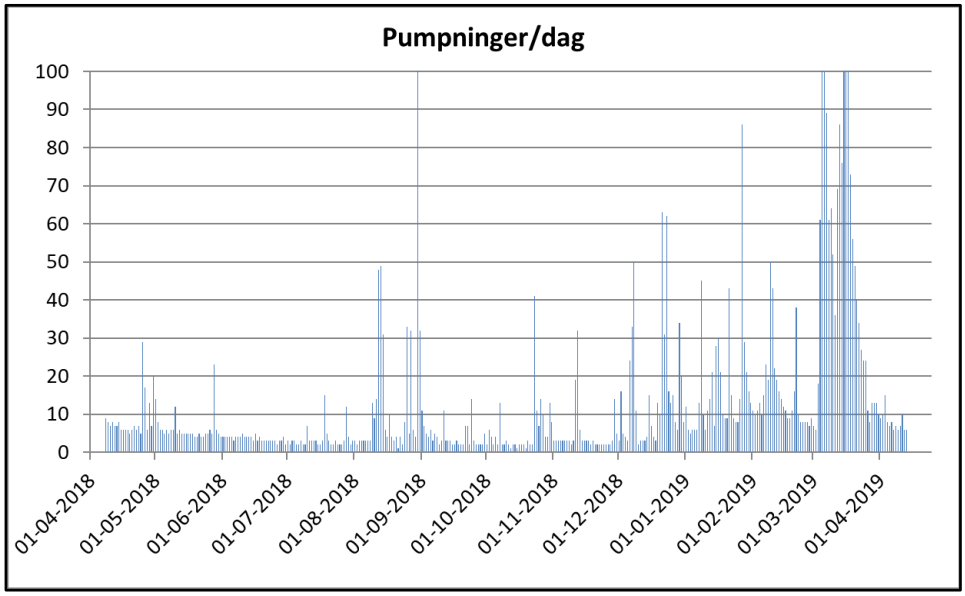
Huset på Valhalvej 50 har to kældre med hver sit omfangsdræn (Figur C.1):

- Omfangsdrænet mod øst ligger så højt, at vandet kan løbe ned i stikledningen til regnvandsledningen, som løber mod øst. Vandet herfra bliver ikke målt.
- Omfangsdrænet mod vest ligger dybere, så vandet herfra løber til en pumpebrønd inde under kældergulvet, hvorfra vandet pumpes op i faldstammen. Ved at registrere antallet af pumpestart og gange med den vandmængde (32 l), der pumpes væk hver gang, kan de oppumpede vandmængder bestemmes.



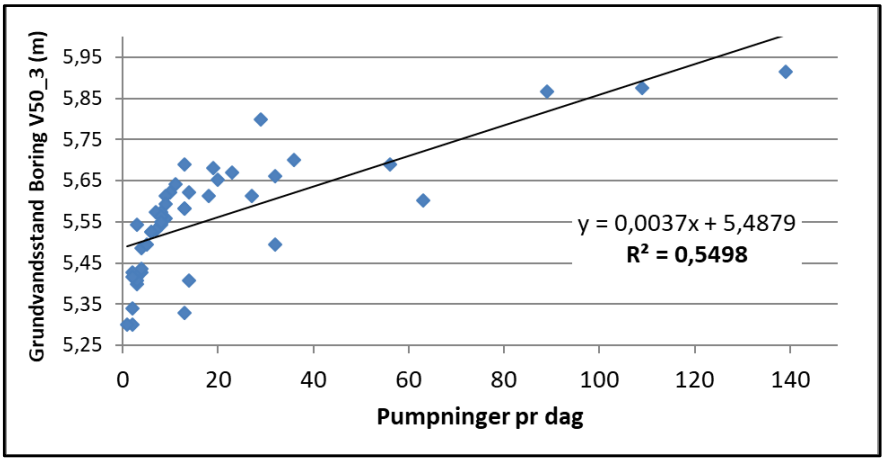
Figur C.1. Principskitse for de to omfangsdræn og opmålte koter baseret på nivellement med vaterpas ud fra pejleboring V50_2, som er GPS bestemt.

Hyppigheden af pumpen ses af Figur C.2 for det første år. Pumpehyppigheden varierer mellem 1-2 gange pr dag i den tørre sommer i 2018 og 139 gange pr dag den 5. marts 2019. I alt er der i et år oppumpet 150 m^3 vand, som svarer til 500 mm, hvis det forudsættes af omfangsdrænet dræner halvdelen af grundens jord (300 m^2).

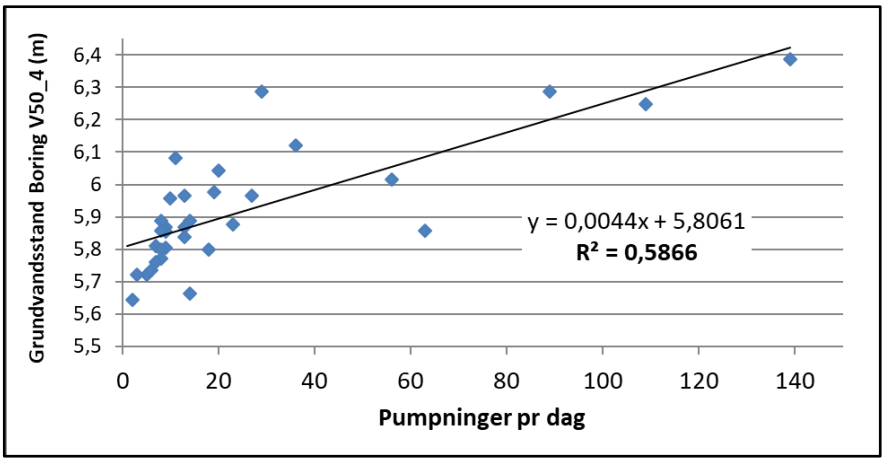


Figur C.2. Antal pumpninger pr dag for perioden 1.4.2018 til 1.4.2019.

Sammenhængen mellem pumpehyppighed og grundvandsspejl i de to af pejleboringerne på grunden er vist på Figur C.3 og Figur C.4. Det ses, at der er en tydelig sammenhæng.



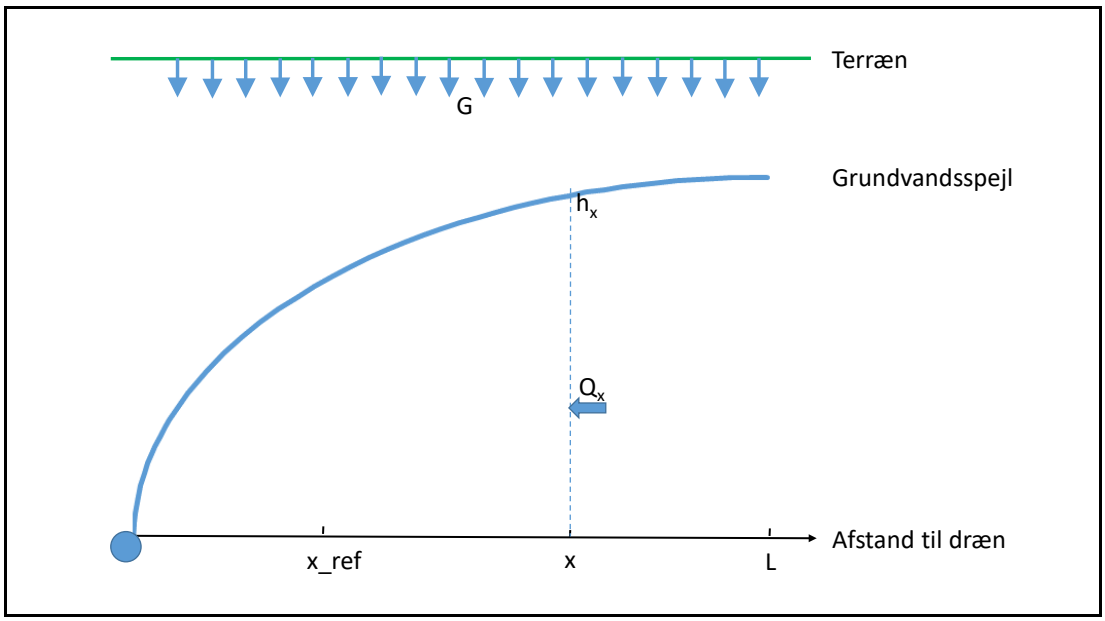
Figur C.3. Sammenhængen mellem pumpehyppighed og pejlet grundvandsspejl i boring V50_3.



Figur C.4. Sammenhængen mellem pumpehyppighed og pejlet grundvandsspejl i boring V50_4.

Bilag D: Formel for justering af drænkoefficienter i JCR model

Princippet bag formlen for justering af drænkoefficienter afhængig af afstanden fra boring til nærmeste dræn er en antagelse om, at der sker en vandstrømning fra et lokalt vandskel hen til et dræn som illustreret på Figur D1.



Figur D1. Principskitse for vandstrømning fra vandskel hen imod dræn

Hvis det forudsættes, at grundvandsdannelsen, G, strømmer horisontalt i det øvre grundvandsspejl henimod drænet, og at der er stationære forhold kan vandstrømningen i afstanden x fra drænet beskrives som:

$$G\,(L-x) = -\,K\,h\,\frac{dh}{dx} \qquad \textit{(Ligning D1)}$$

hvor

G	*= grundvandsdannelse*
L	*= afstand fra vandskel til dræn*
x	*= afstand fra boring til dræn*
h	*= højde af grundvandsspejlet over drænniveau*
K	*= horisontal hydrauliske ledningsevne i jordlaget*

Faconen på den krumme kurve med grundvandsspejlet kan nu findes ved at løse differentialligningen (Lign. D1). Det resulterer i følgende ligning for grundvandsspejlet i afstanden x:

$$h_x = \sqrt{\frac{G}{K}(2Lx - x^2)} \qquad \textit{(Ligning D2)}$$

Vandmængden, der strømmer fra boringen i afstanden x fra drænet, beregnes i modellen som:

$$Q_x = DR_x\,h_x \qquad \textit{(Ligning D2)}$$

hvor

Q_x = vandstrømning i afstanden x hen imod dræn

DR_x = drænkoefficient for boring i afstand x fra dræn

h_x = højde af det terrænnære grundvandsspejl i afstanden x fra dræn

Qx er også den vandmængde, der svarer til grundvandsdannelsen mellem boringen i afstand x og vandskellet i afstand L, dvs.:

$$Q_x = G\,(L-x) \qquad \textit{(Ligning D3)}$$

Ved at kombinere de tre ligninger kan drænkoefficienten i afstanden x beregnes til:

$$DR_x = \frac{Q_x}{h_x} = \frac{G\,(L-x)}{h_x} = \frac{G\,(L-x)}{\sqrt{\frac{G}{K}(2Lx-x^2)}} \qquad \textit{(Ligning D4)}$$

Herefter kan forholdet mellem drænkoefficienten for en boring i afstanden x og en boring i en referenceafstand x_ref beregnes som

$$DR_x = DR_{x_ref}\frac{L-x}{L-x_ref}\sqrt{\frac{2\,L\,x_ref-x_ref^2}{2\,L\,x-x^2}} \qquad \textit{(Ligning D5)}$$

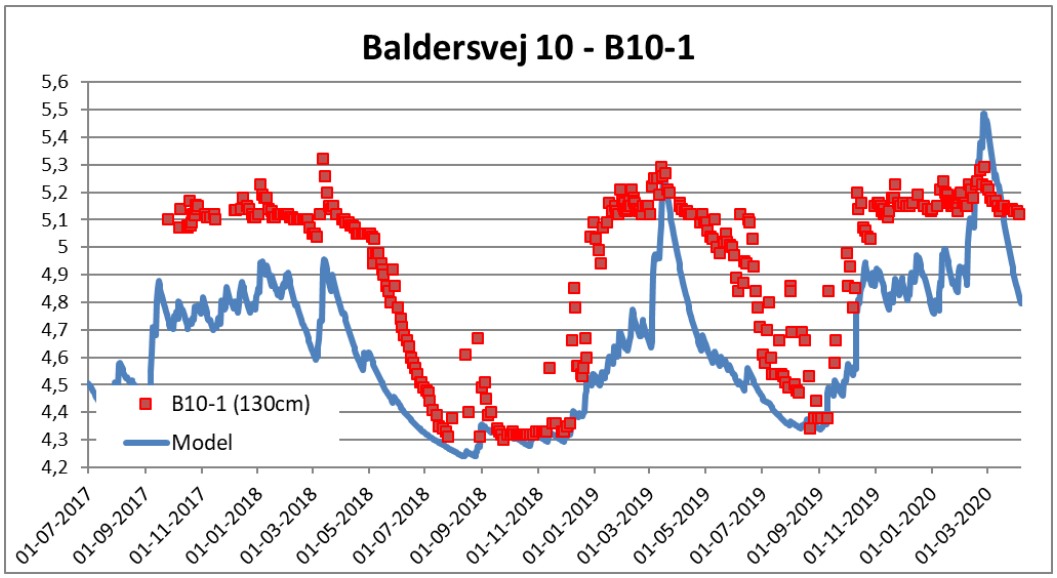
Parameterværdien $DR_{omf\text{-}dræn}$ er i Tabel 1 angivet for en referenceafstand på x_ref = 5 m, mens parameterværdierne $DR_{top\text{-}dræn}$ og $DR_{bund\text{-}dræn}$ er angivet for en referenceafstand på x_ref = 10 m. Afstanden til det lokale vandskel vælges til L = 35 m, svarende til at Fors' rør på to parallelle veje typisk ligger med ca. den dobbelte afstand. Betydningen af Ligning D5 for drænkoefficienterne til de to horisontale dræn er illustreret i Tabel D1. Tallene i tabellen viser. at et dræn i 5 m afstand fra et rør dræner 63% hurtigere end et dræn i 10 m afstand. Tilsvarende vil et dræn i 25 m afstand dræne mere end tre gange langsommere.

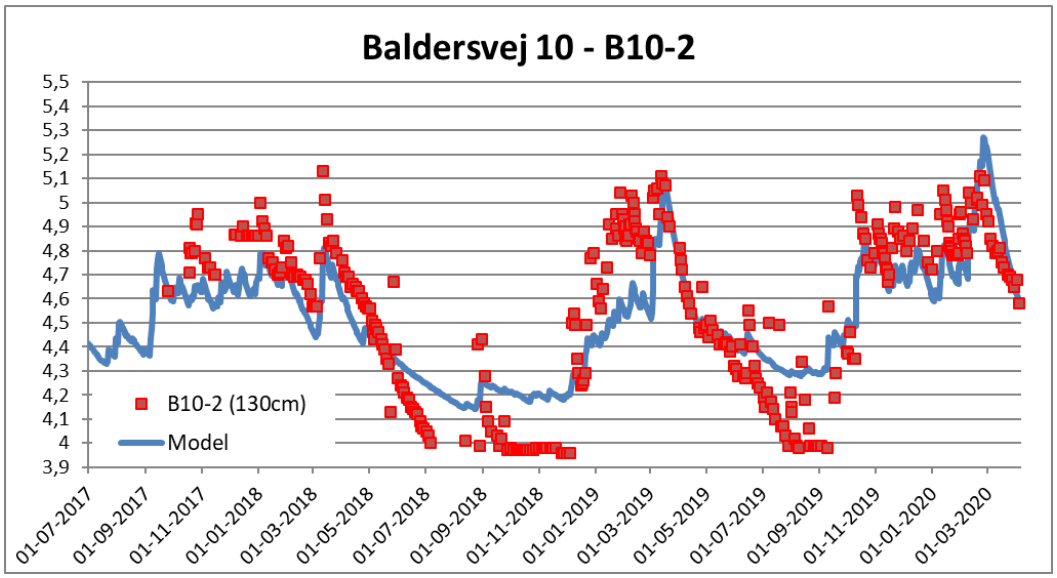
Tabel D1 Drænkoefficienten som funktion af afstanden fra boring til nærmeste dræn. Tallene beregnes med Ligning D5

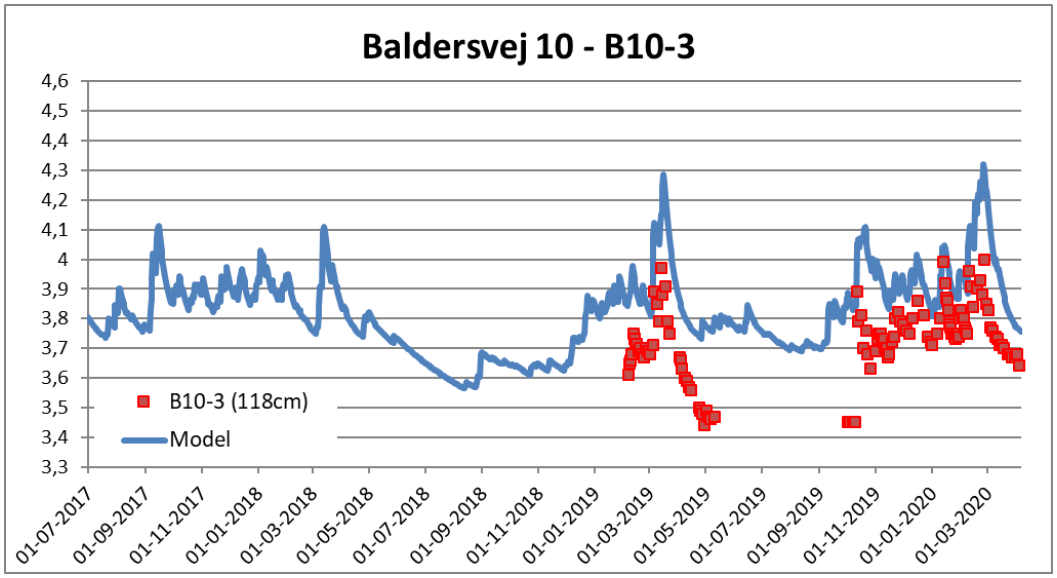
Afstand x [m]	**DR_x /DR_{x_ref}**
2	2,77
5	1,63
10	1,00
20	0,46
25	0,29
30	0,14

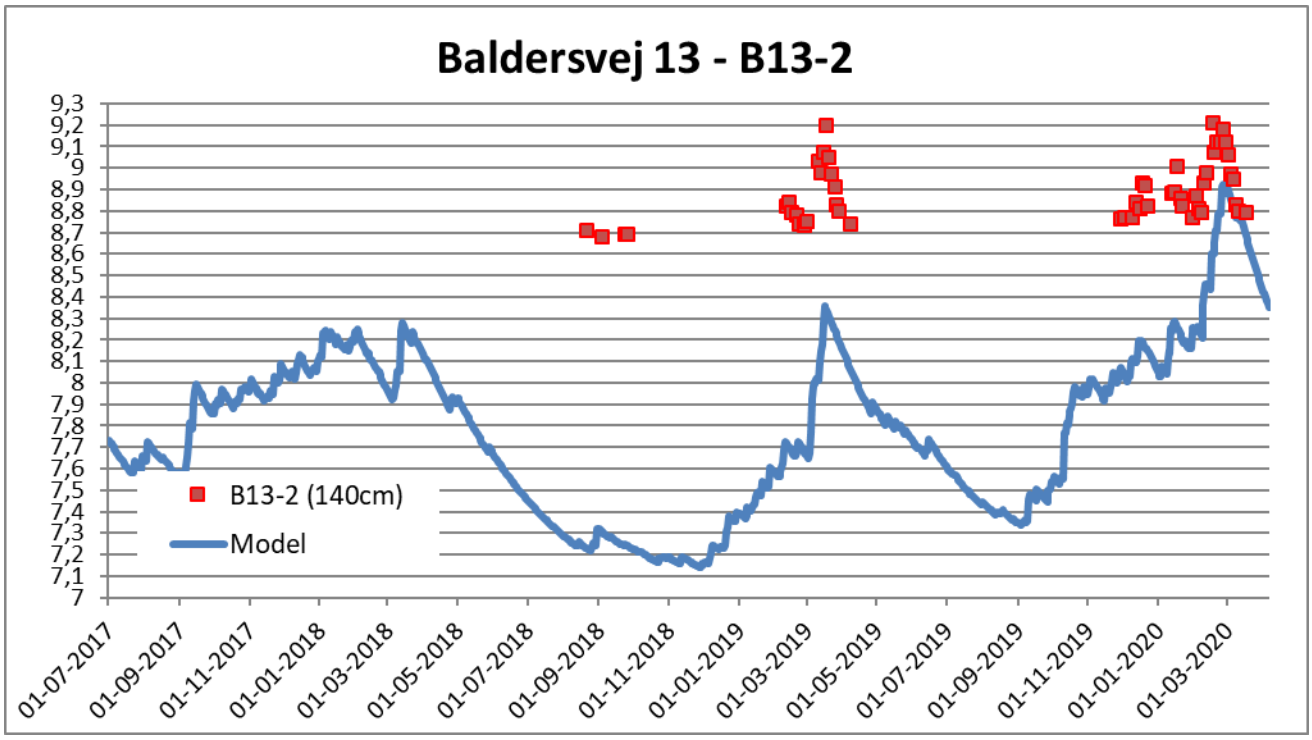
Udledningen af formlen i Ligning D5 er baseret på forudsætninger, som ikke holder helt i praksis og formlen er derfor en kraftig simplifikation af virkeligheden. Data fra pejleboringerne viser dog, at den overordnede tendens med hurtigere (mere effektiv) horisontal dræning tæt på rørtraceer er korrekt. Alternativet til at benytte en formel af den her type ville være, at alle drænkoefficienter skulle bestemmes individuelt for hver boring, og så ville hele modellen ende med at få alt for mange parameterværdier (79 parameterværdier imod 6 i den nuværende model) til estimering via kalibrering. Resultatet heraf ville være, at kalibreringerne ville udarte til at blive ren "kurvefitning" med det resultat, at modellen ikke ville være robust nok til med troværdighed at kunne forudsige effekter af ændret oppumpning eller klimaændringer.

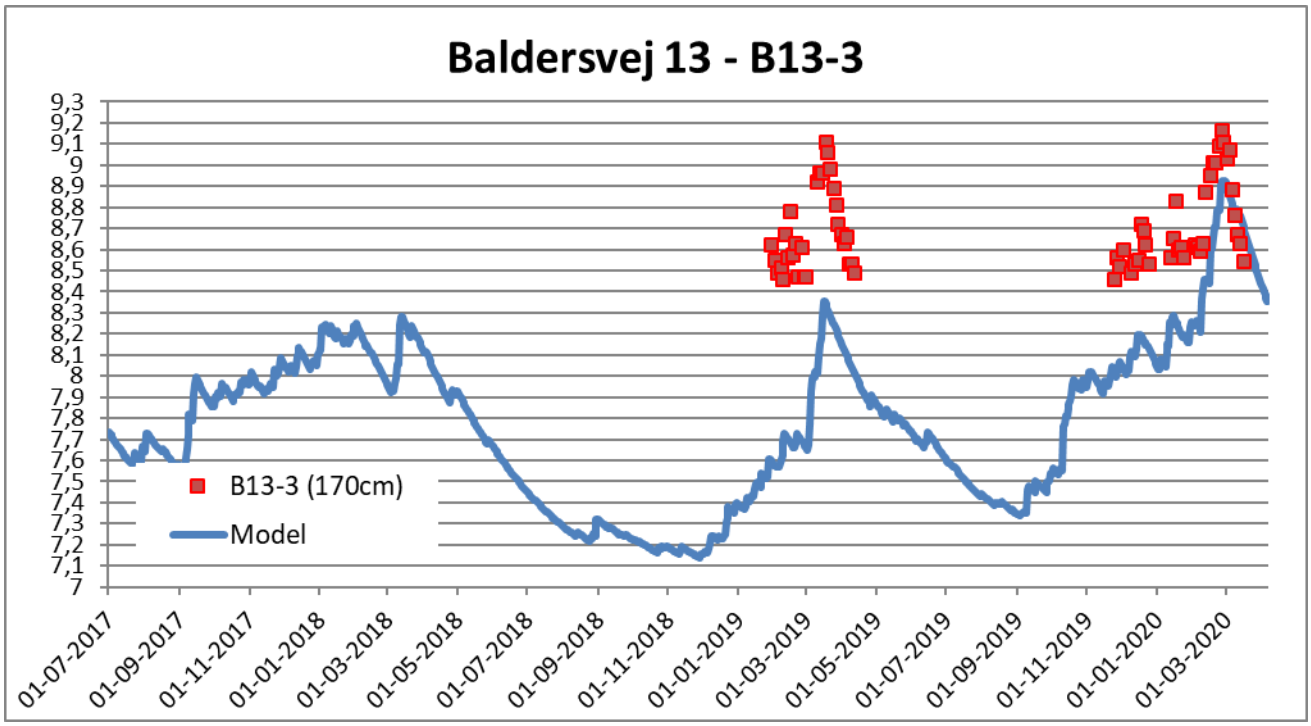
Bilag E: Simuleringsresultater med JCR-modellen

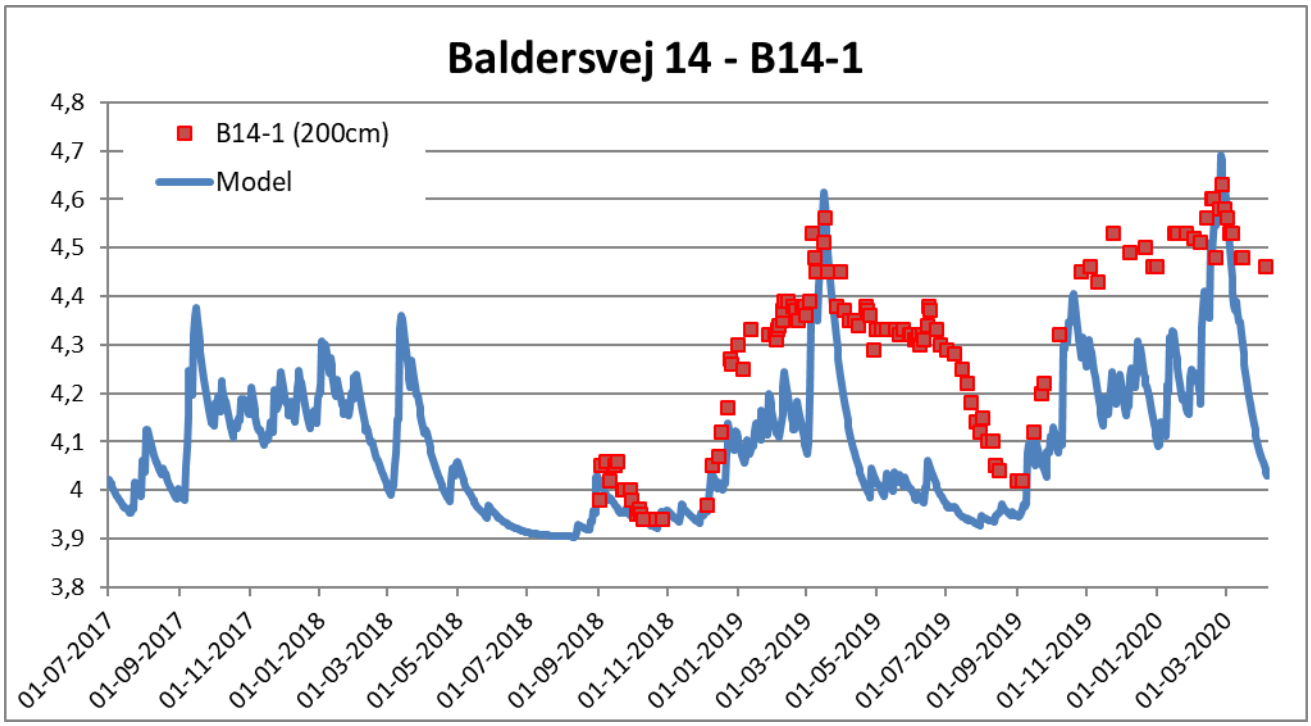


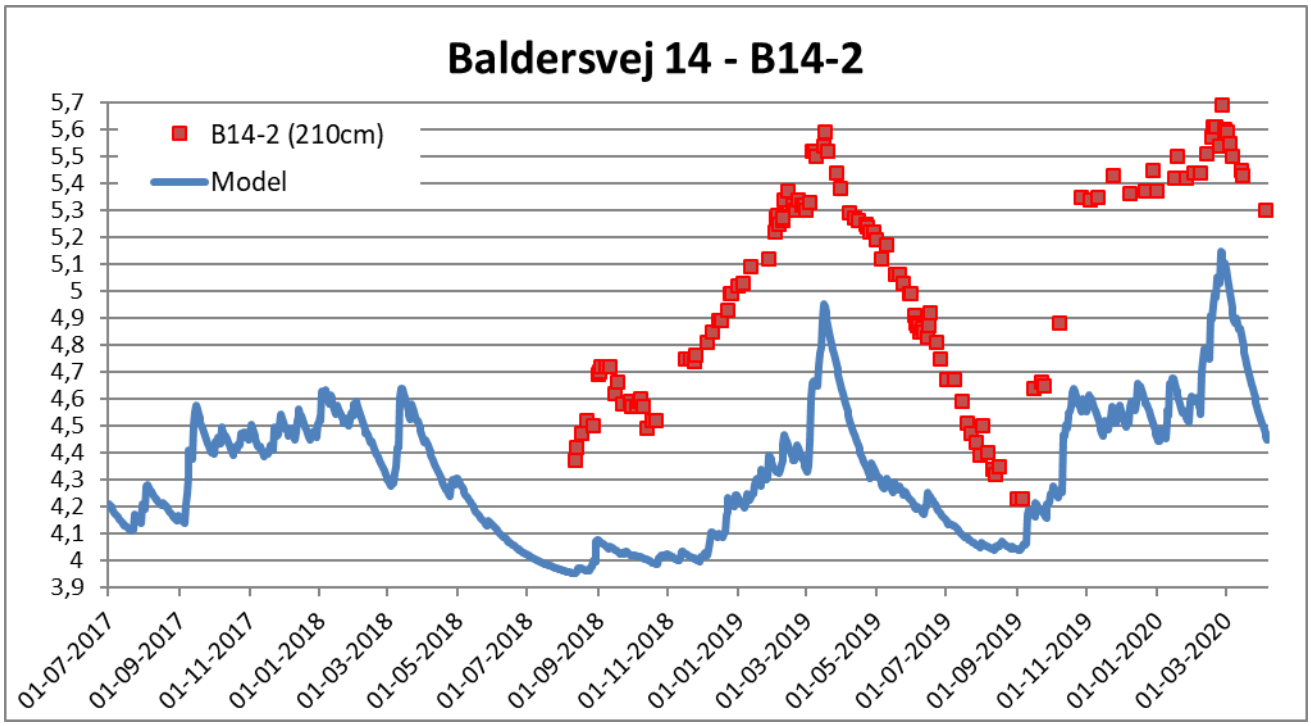


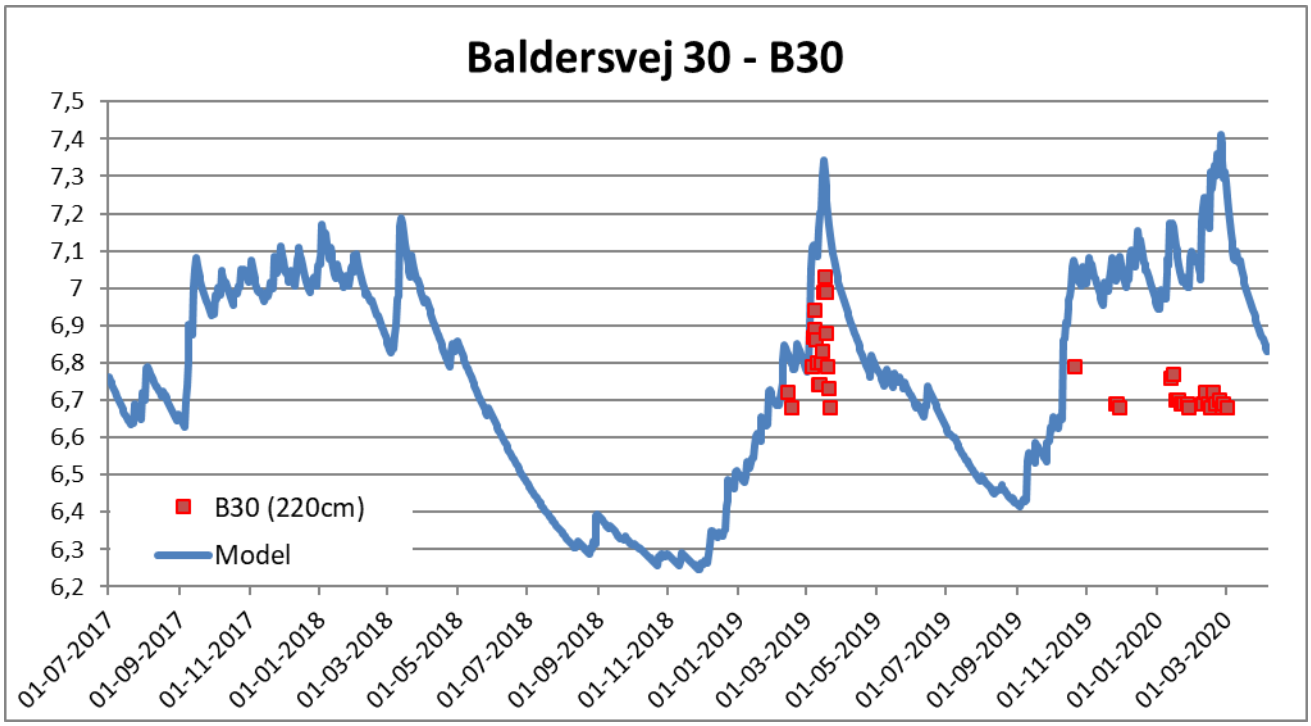


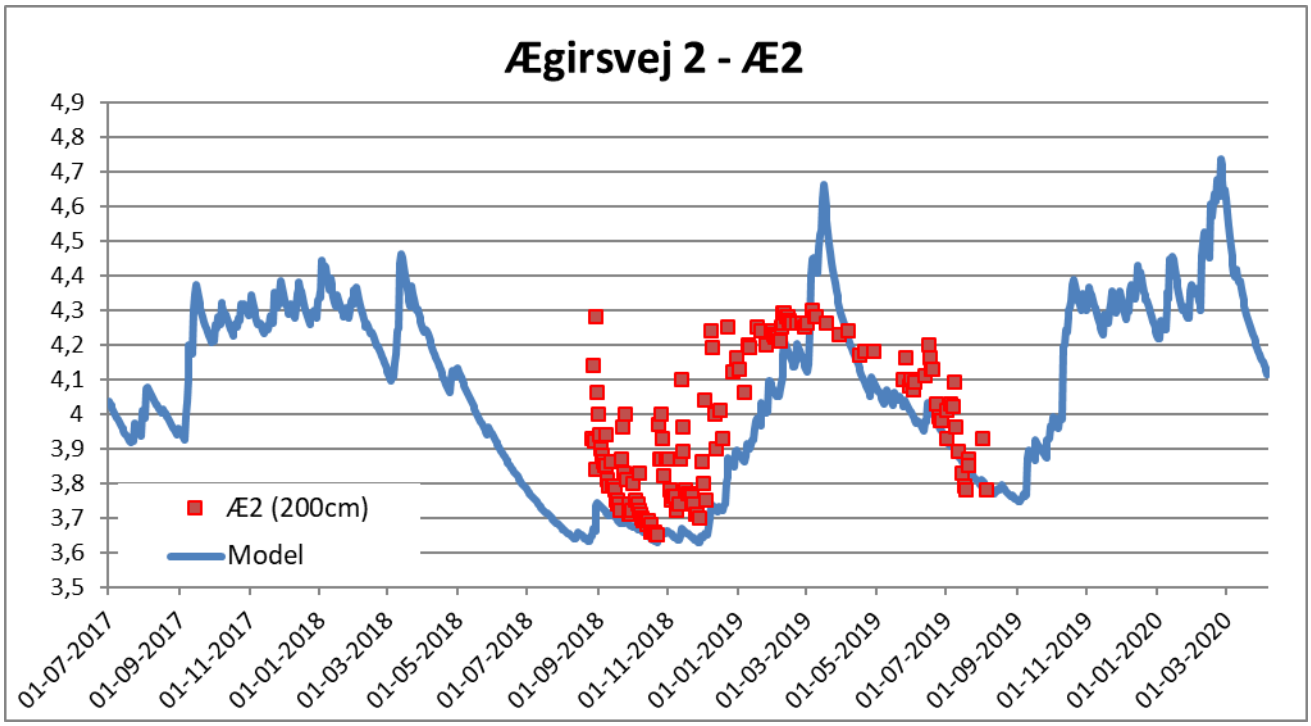

Baldersvej 13 - B13-2
9,3
9,2
9,1
9
8,9
8,8
8,7
8,6
8,5
8,4
8,3
8,2
8,1
8
7,9
7,8
7,7
7,6
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
B13-2 (140cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

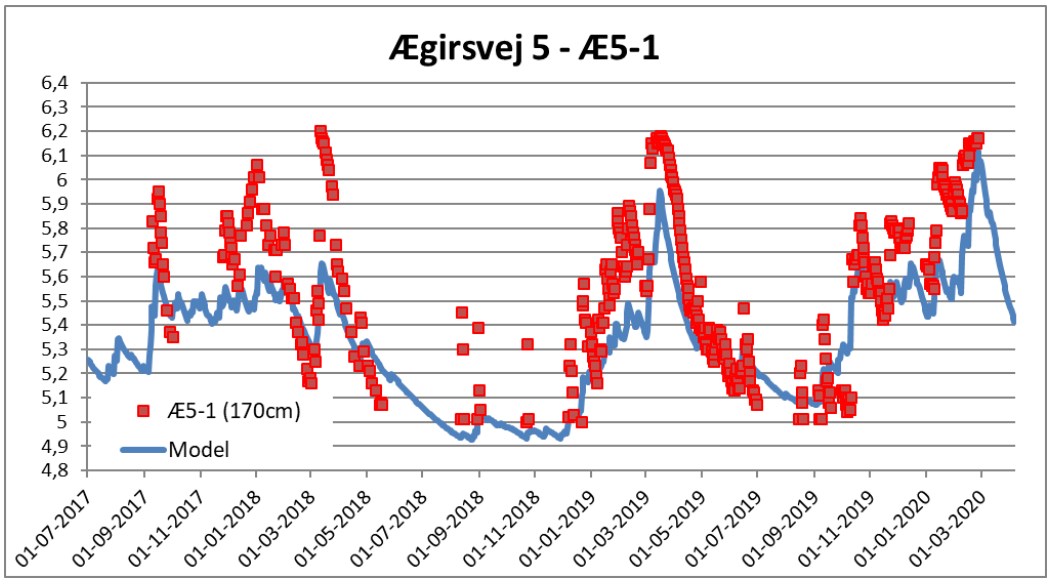

Baldersvej 13 - B13-3
9,3
9,2
9,1
9
8,9
8,8
8,7
8,6
8,5
8,4
8,3
8,2
8,1
8
7,9
7,8
7,7
7,6
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
B13-3 (170cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

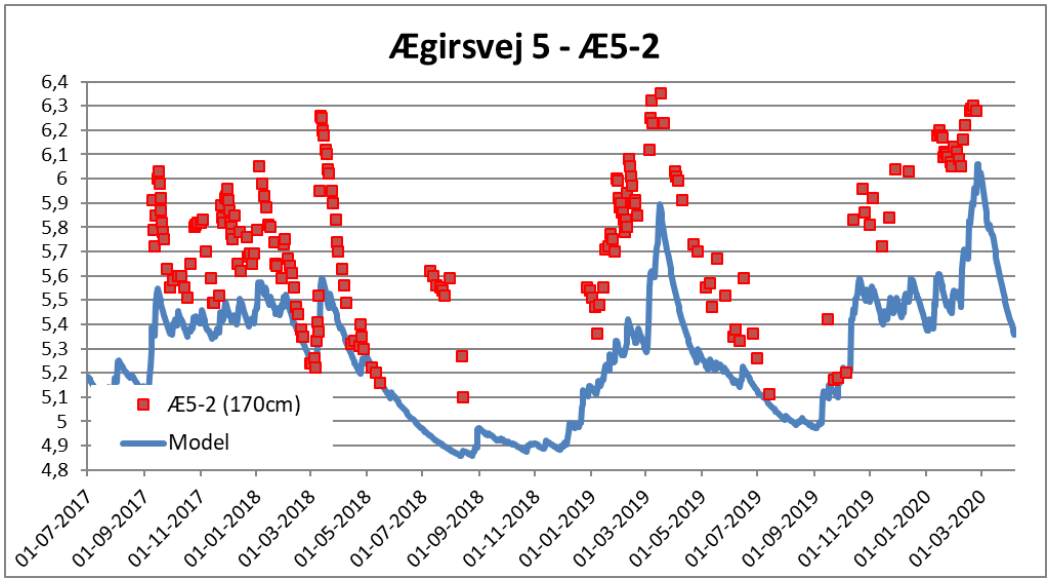

Baldersvej 14 - B14-1
B14-1 (200cm)
Model
4,8
4,7
4,6
4,5
4,4
4,3
4,2
4,1
4
3,9
3,8
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

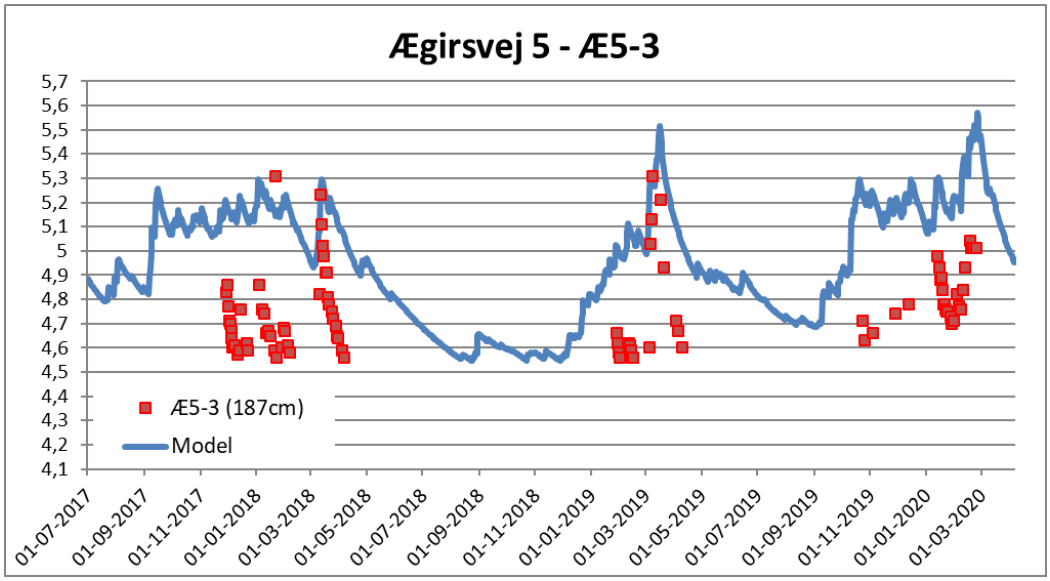

Baldersvej 14 - B14-2
B14-2 (210cm)
Model
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
5,1
5
4,9
4,8
4,7
4,6
4,5
4,4
4,3
4,2
4,1
4
3,9
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

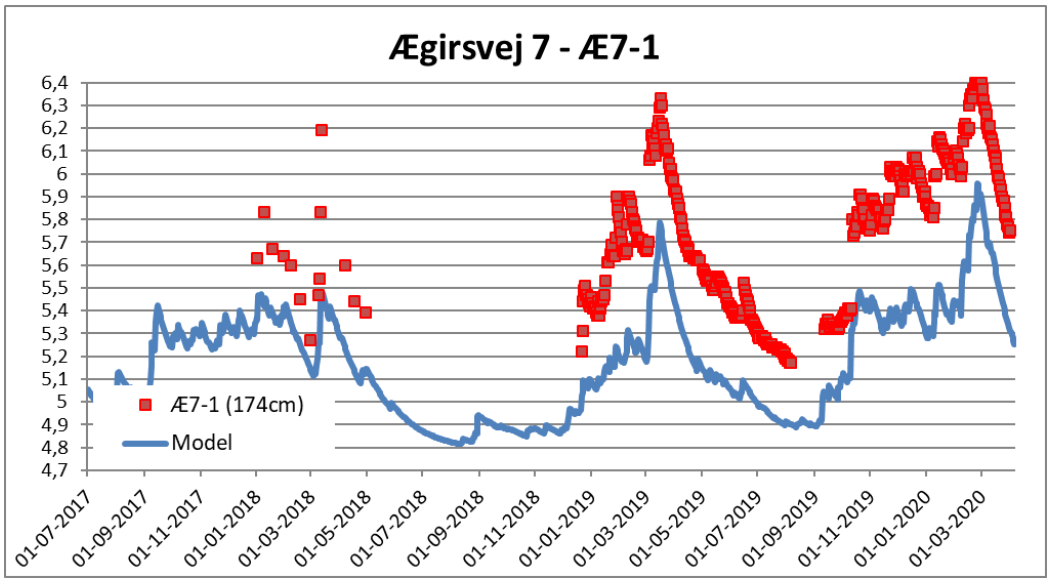

Baldersvej 30 - B30
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
6,9
6,8
6,7
6,6
6,5
6,4
6,3
6,2
B30 (220cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

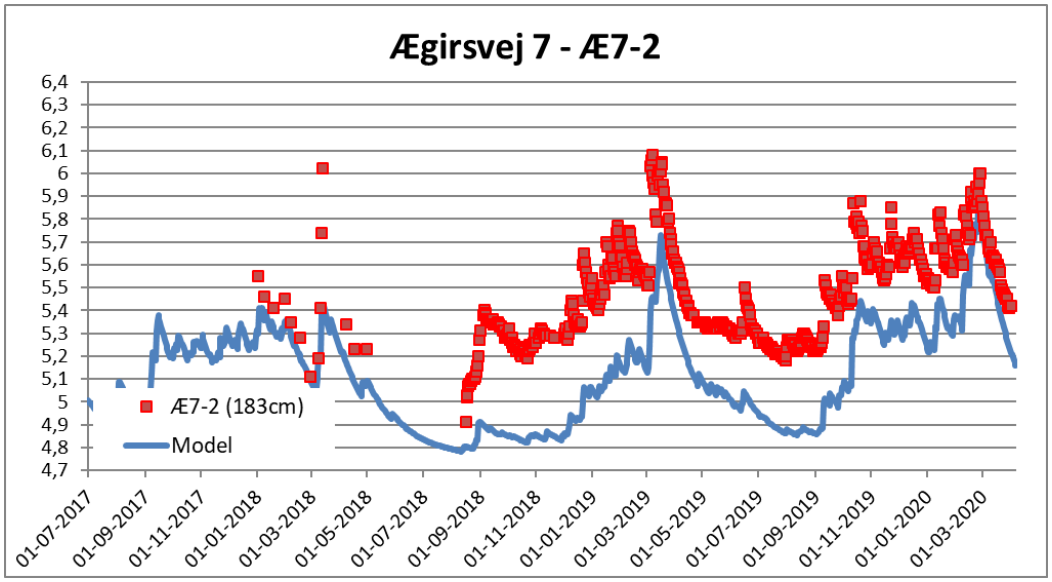

Ægirsvej 2 - Æ2
4,9
4,8
4,7
4,6
4,5
4,4
4,3
4,2
4,1
4
3,9
3,8
3,7
3,6
3,5
Æ2 (200cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

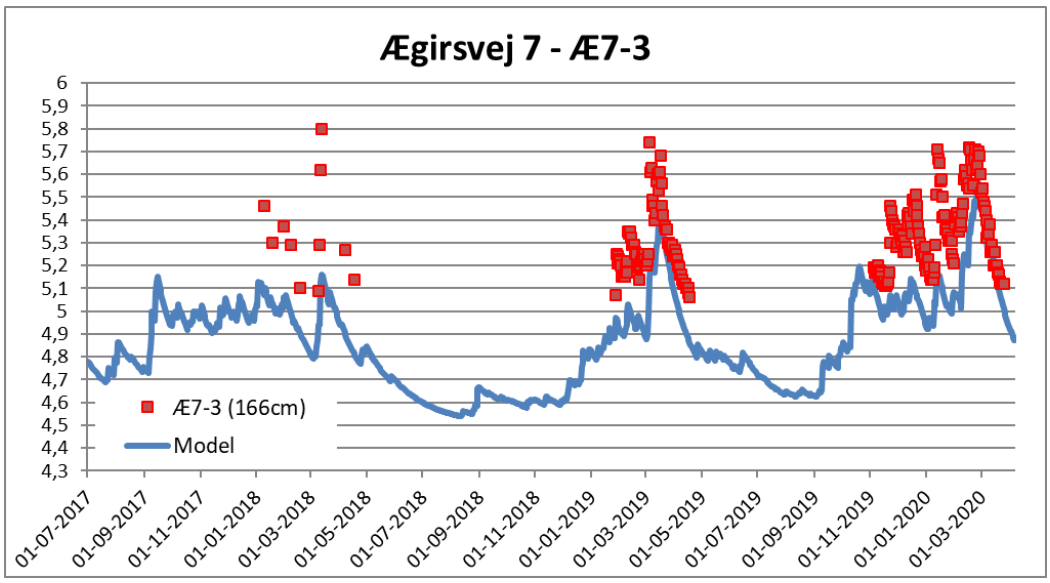

Ægirsvej 5 - Æ5-1
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
5,1
5
4,9
4,8
Æ5-1 (170cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

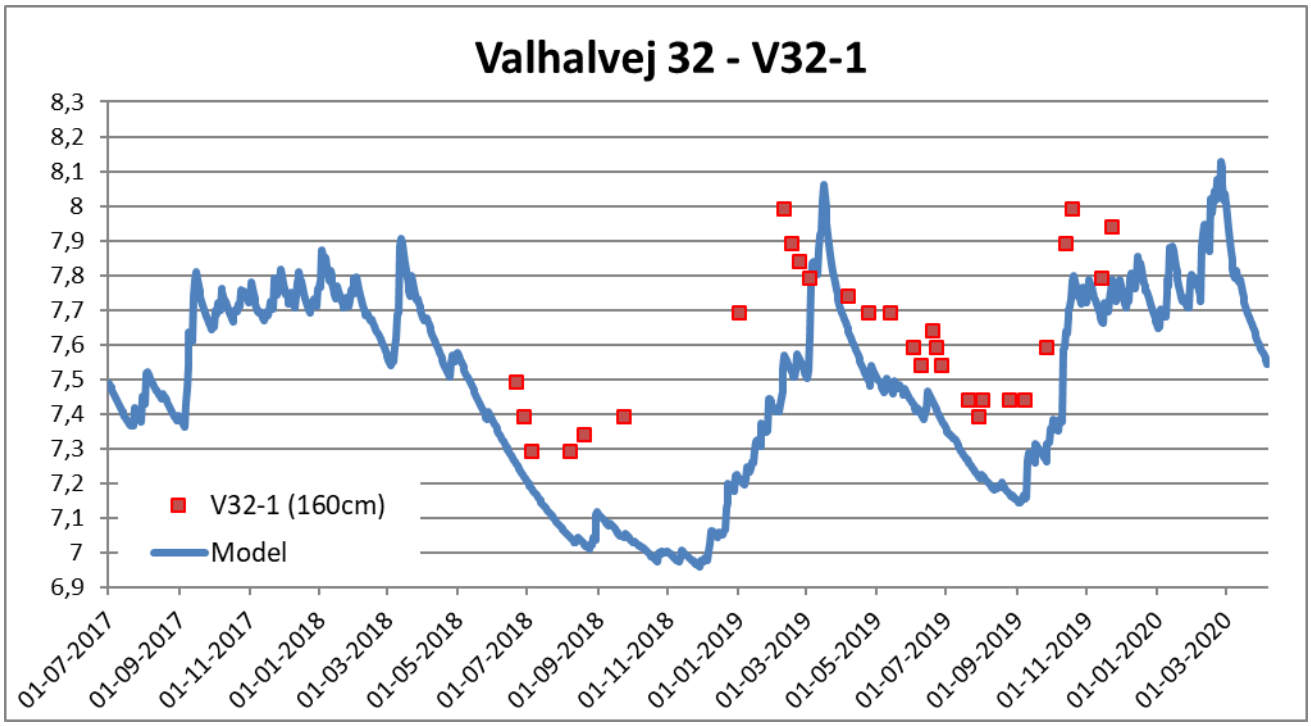

Ægirsvej 5 - Æ5-2
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
5,1
5
4,9
4,8
Æ5-2 (170cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

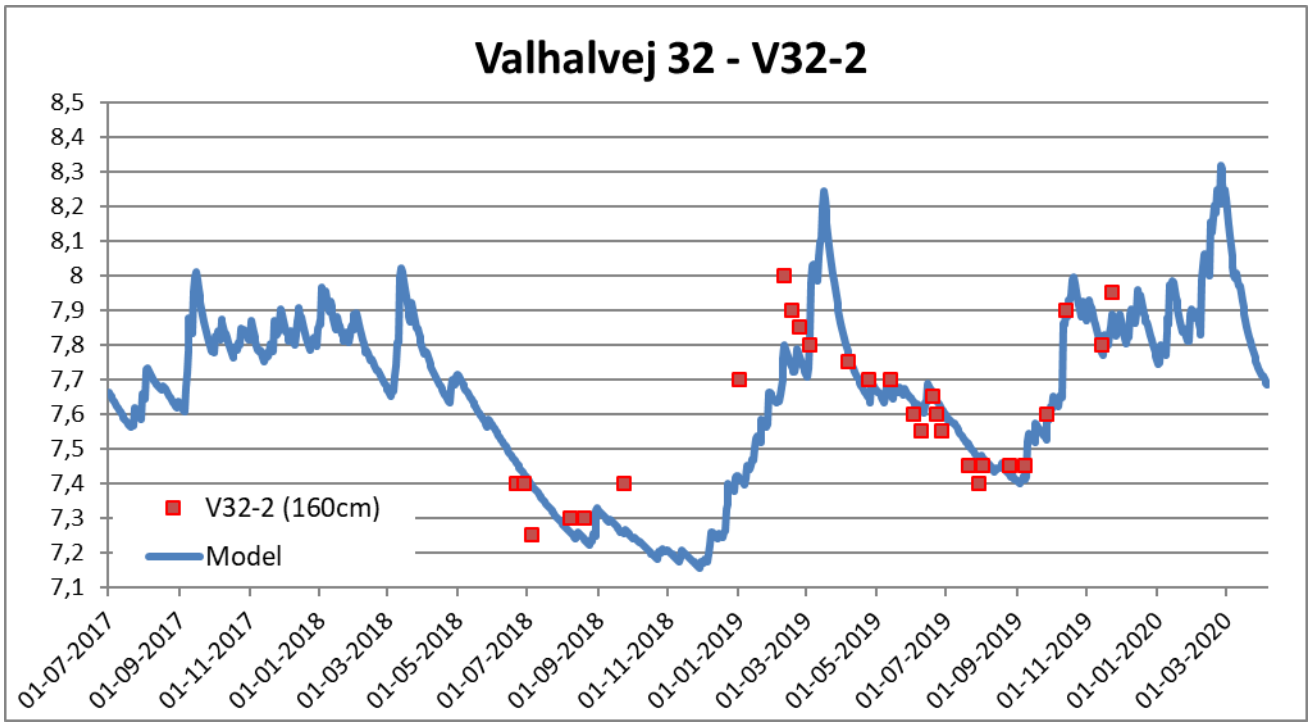

Ægirsvej 5 - Æ5-3
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
5,1
5
4,9
4,8
4,7
4,6
4,5
4,4
4,3
4,2
4,1
Æ5-3 (187cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

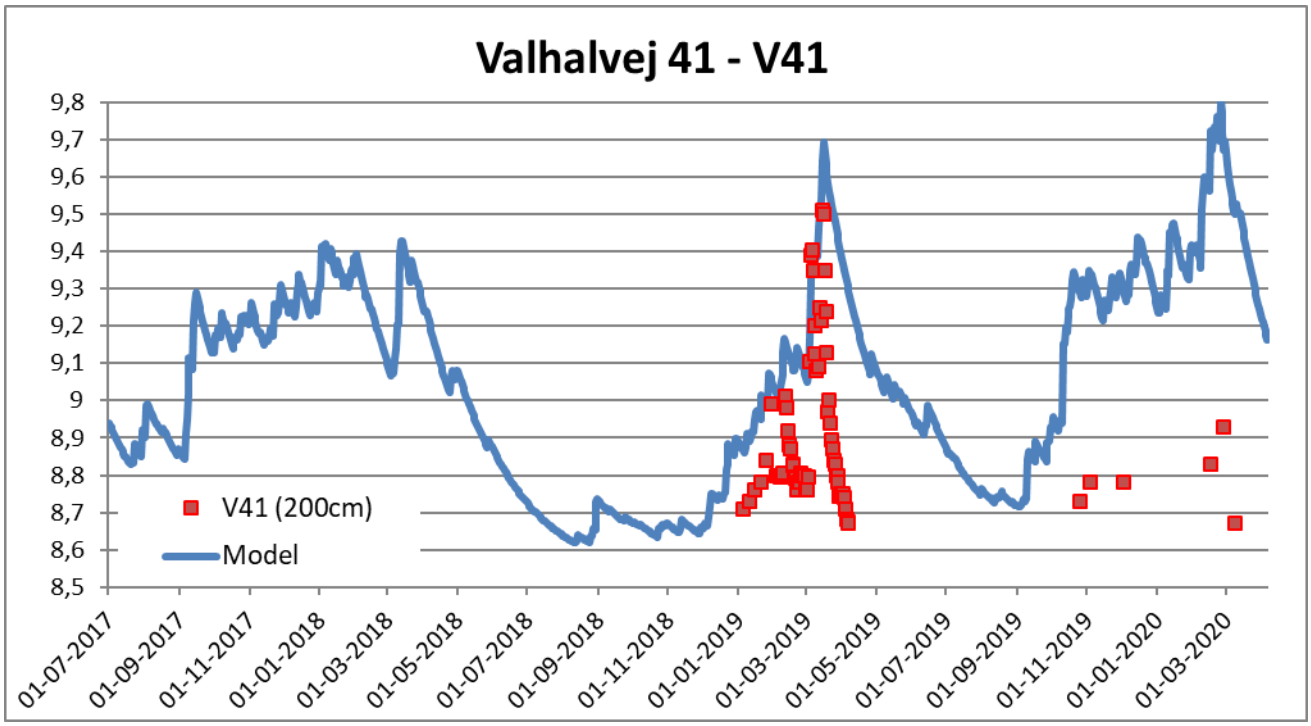

Ægirsvej 7 - Æ7-1
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
5,1
5
4,9
4,8
4,7
Æ7-1 (174cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

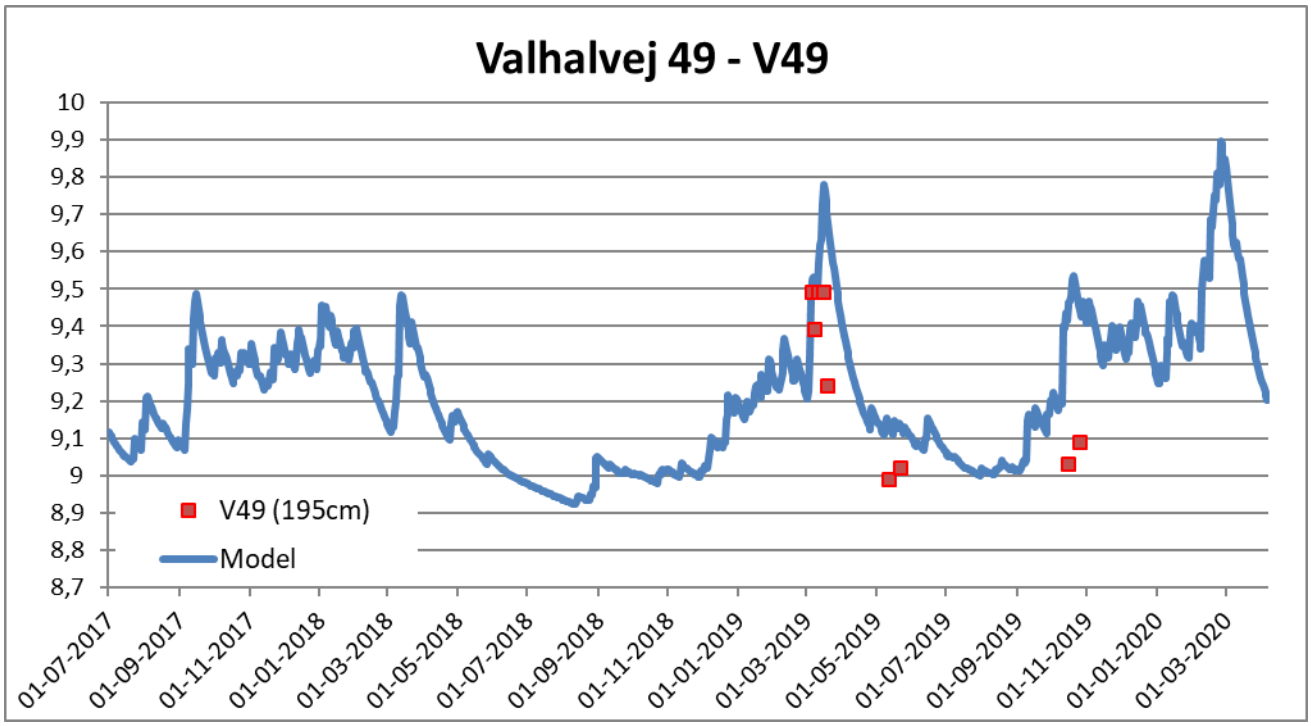

Ægirsvej 7 - Æ7-2
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
5,1
5
4,9
4,8
4,7
Æ7-2 (183cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

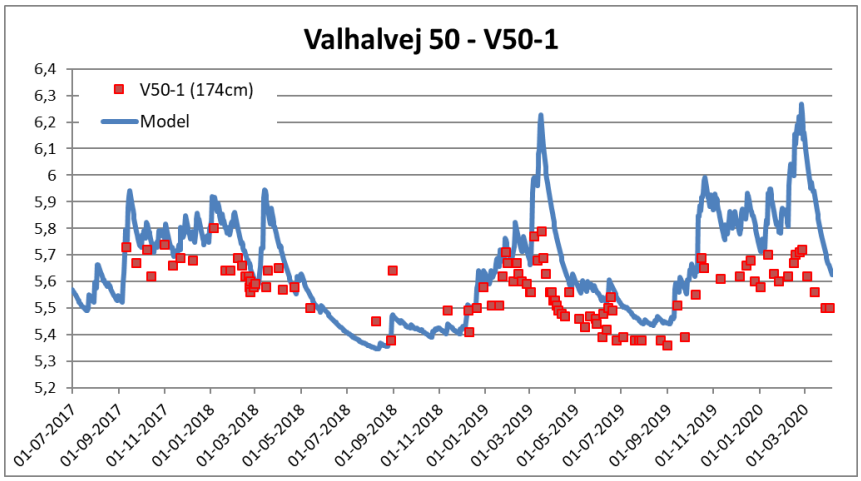

Ægirsvej 7 - Æ7-3
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
5,1
5
4,9
4,8
4,7
4,6
4,5
4,4
4,3
Æ7-3 (166cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

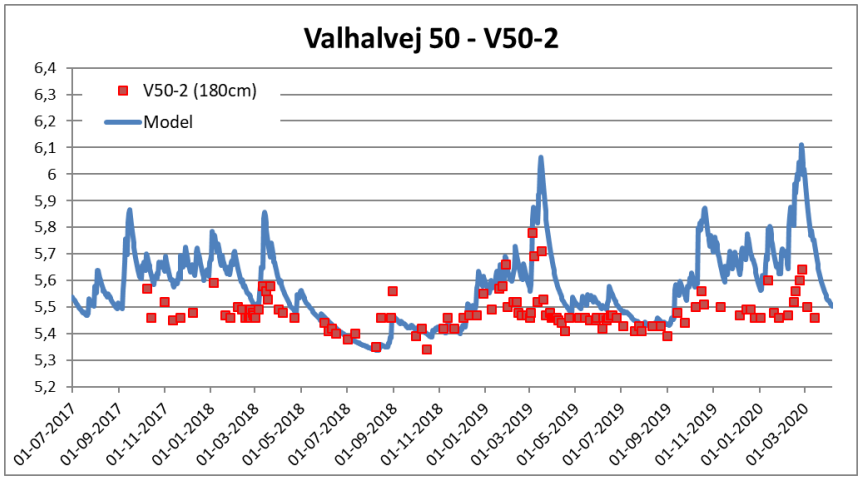

Valhalvej 32 - V32-1
8,3
8,2
8,1
8
7,9
7,8
7,7
7,6
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
6,9
V32-1 (160cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

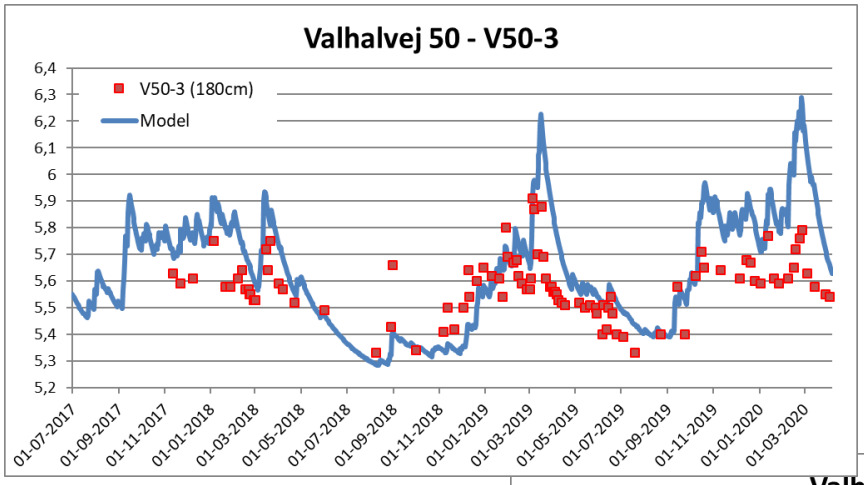

Valhalvej 32 - V32-2
8,5
8,4
8,3
8,2
8,1
8
7,9
7,8
7,7
7,6
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
V32-2 (160cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

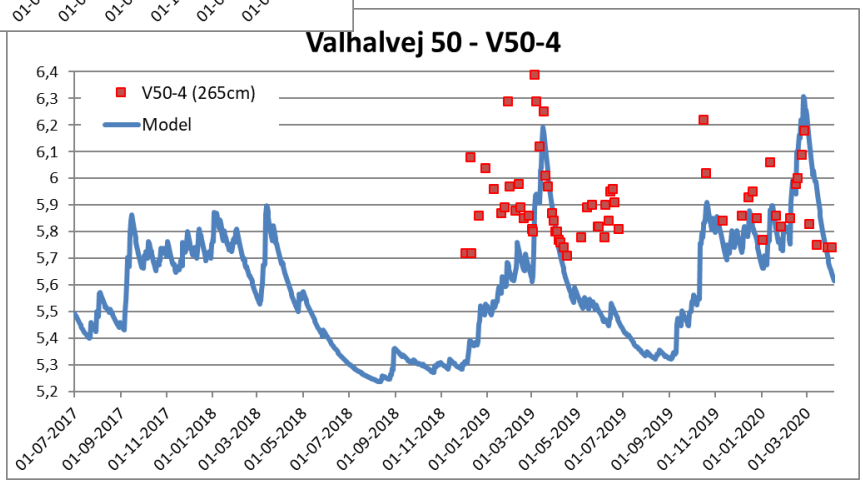

Valhalvej 41 - V41
9,8
9,7
9,6
9,5
9,4
9,3
9,2
9,1
9
8,9
8,8
8,7
8,6
8,5
V41 (200cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

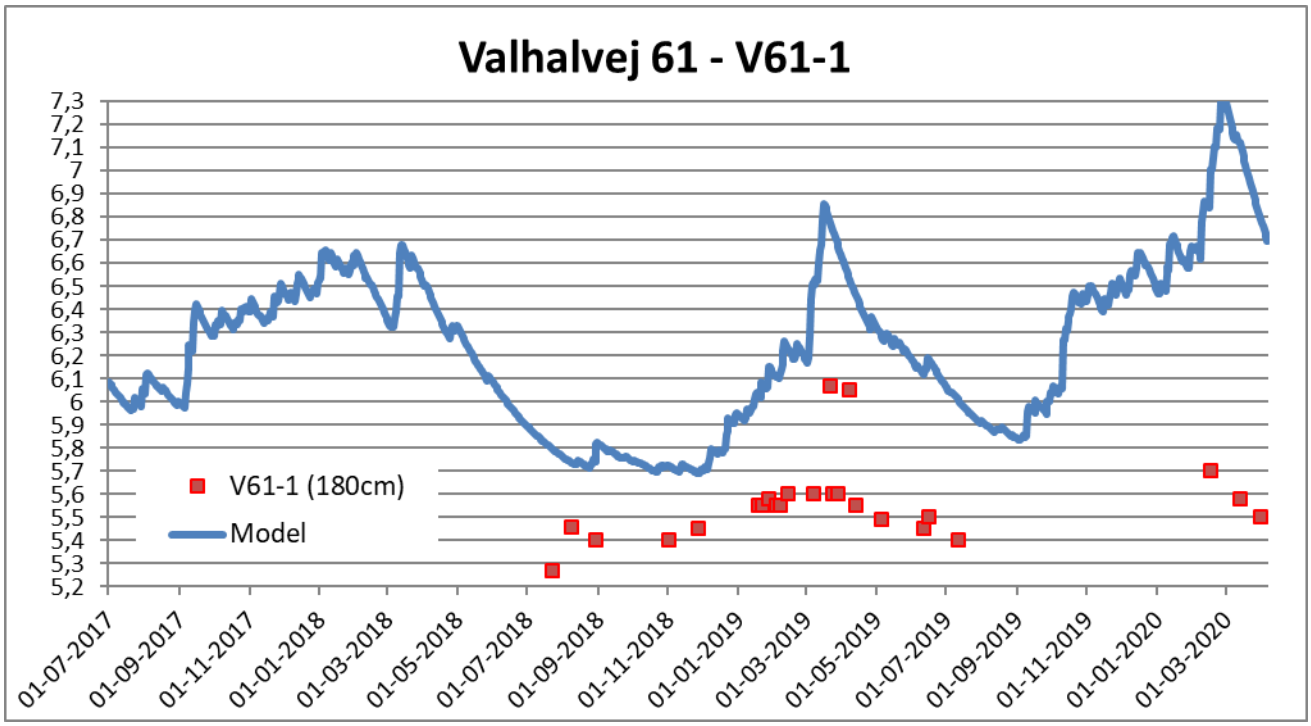

Valhalvej 49 - V49
10
9,9
9,8
9,7
9,6
9,5
9,4
9,3
9,2
9,1
9
8,9
8,8
8,7
V49 (195cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

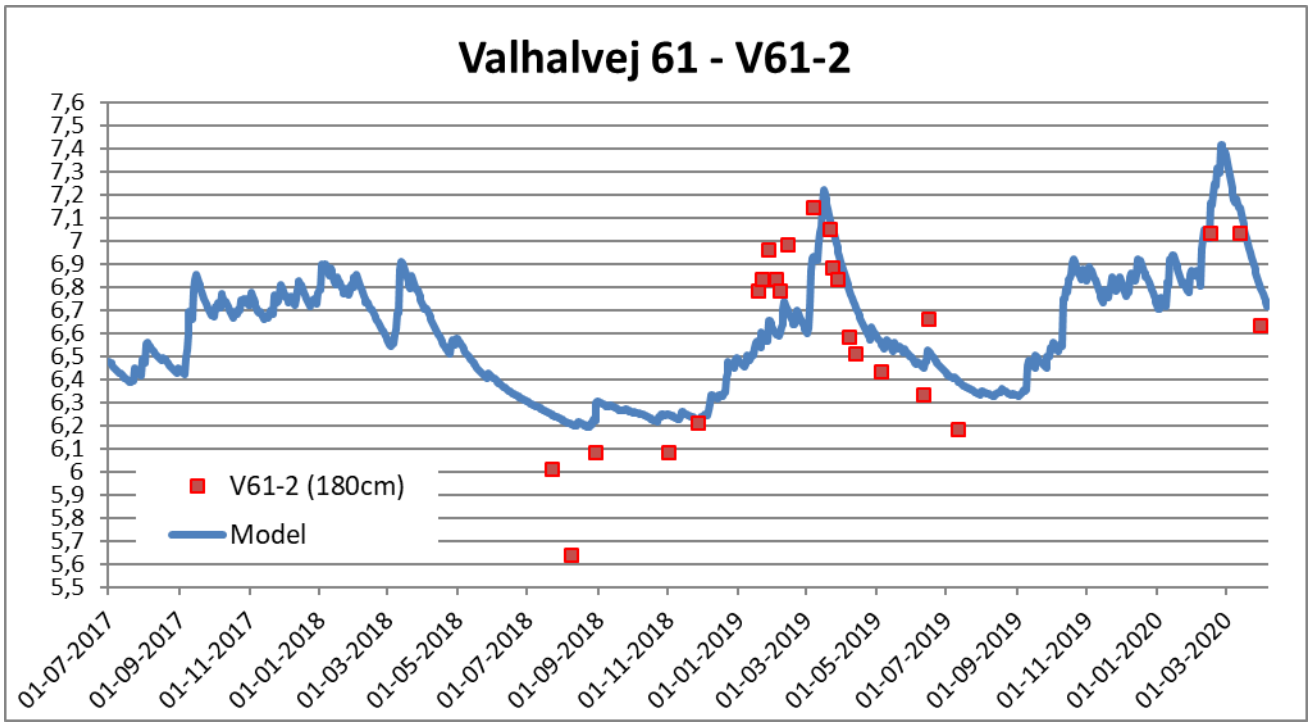

Valhalvej 50 - V50-1
V50-1 (174cm)
Model
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

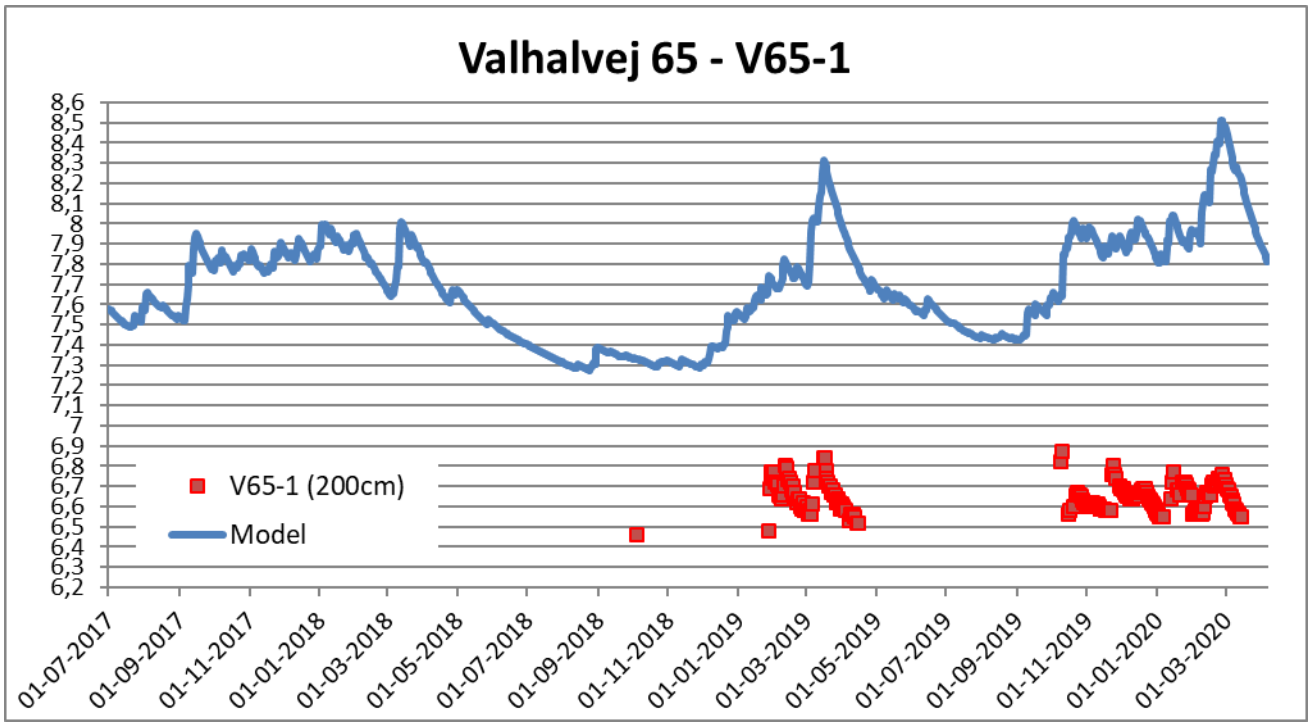

Valhalvej 50 - V50-2
V50-2 (180cm)
Model
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

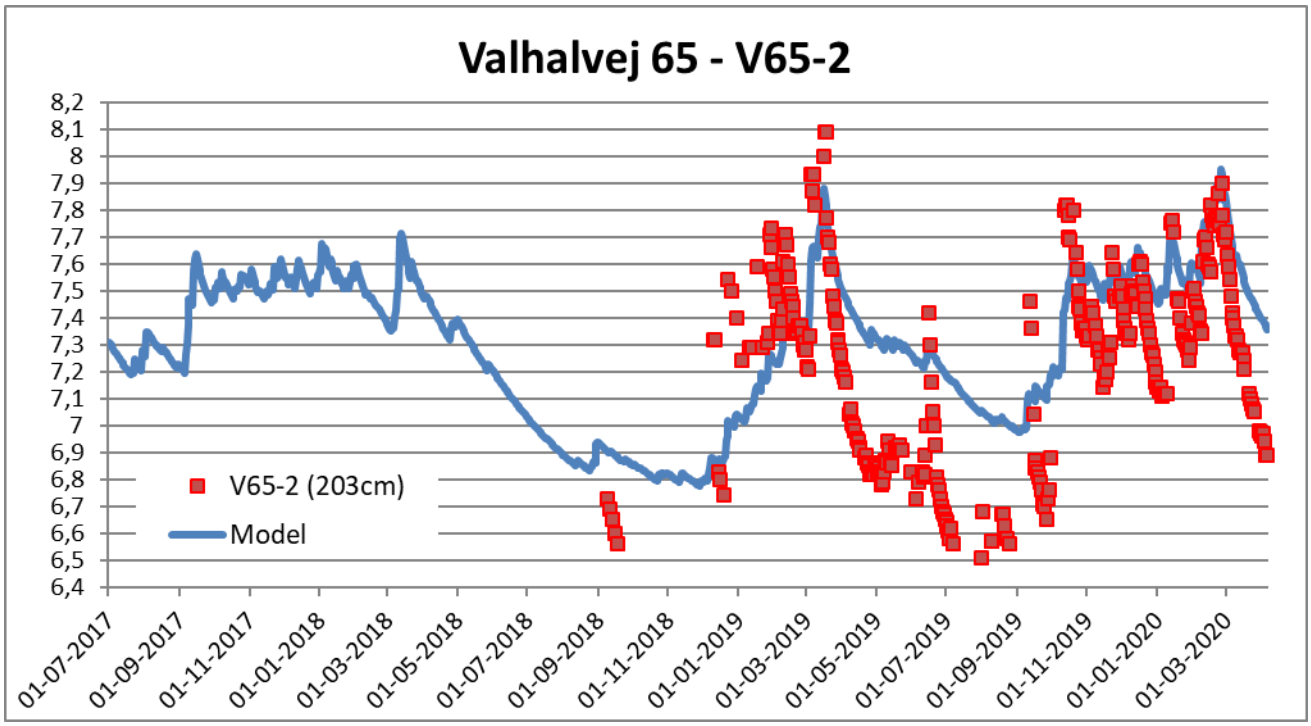

Valhalvej 50 - V50-3
V50-3 (180cm)
Model
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

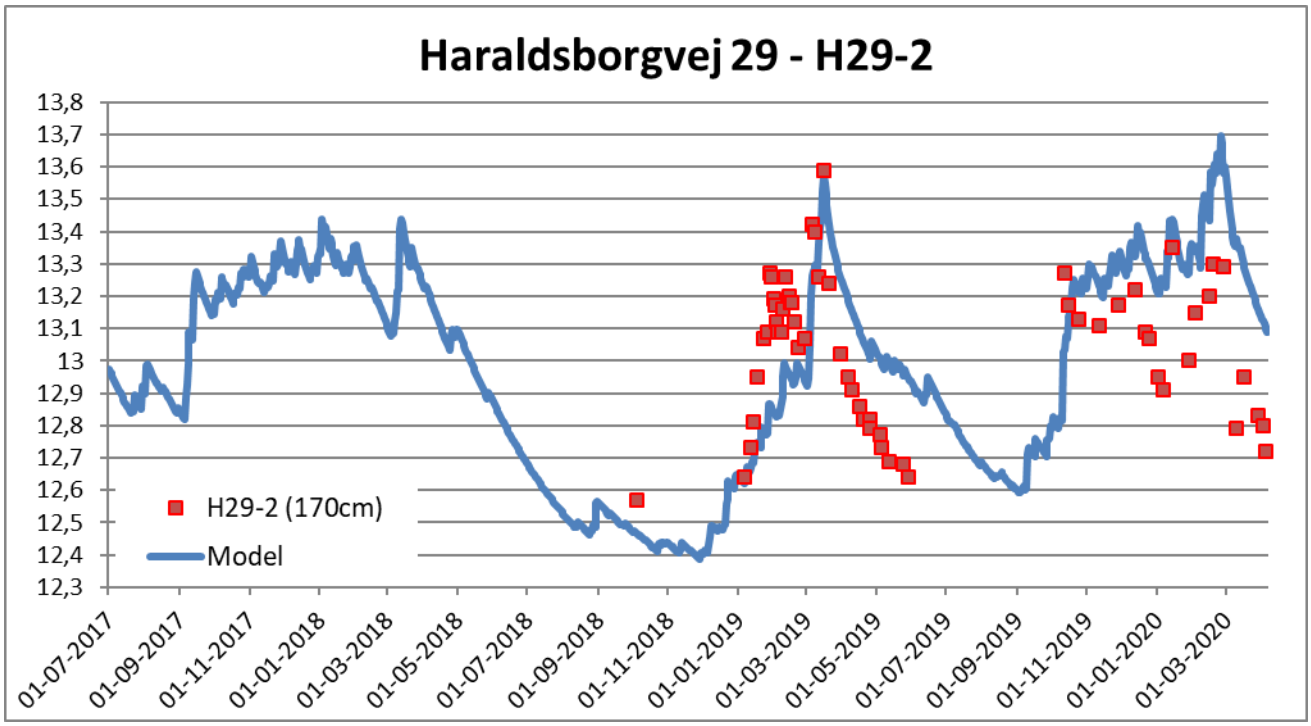

Valhalvej 50 - V50-4
V50-4 (265cm)
Model
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

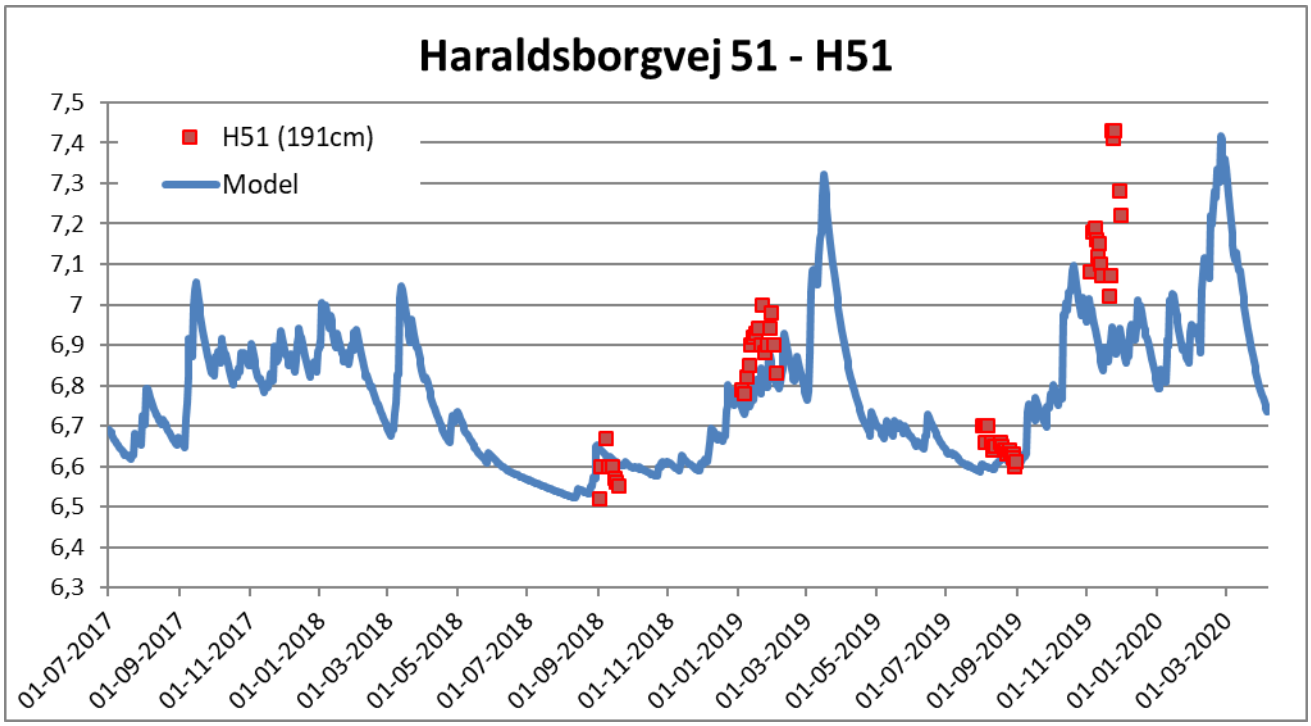

Valhalvej 61 - V61-1
7,3
7,2
7,1
7
6,9
6,8
6,7
6,6
6,5
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
5,3
5,2
V61-1 (180cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

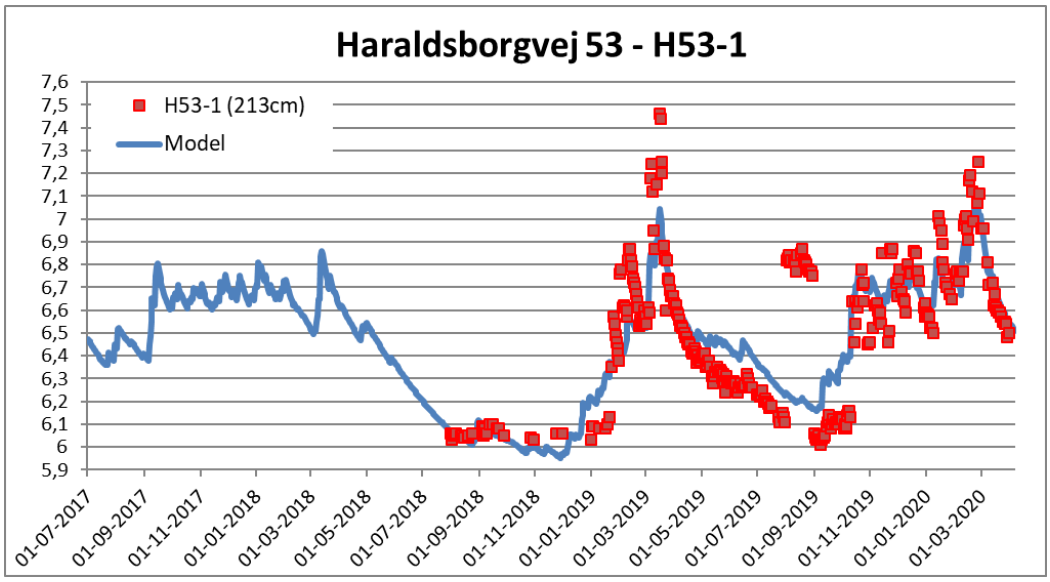

Valhalvej 61 - V61-2
7,6
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
6,9
6,8
6,7
6,6
6,5
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
V61-2 (180cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

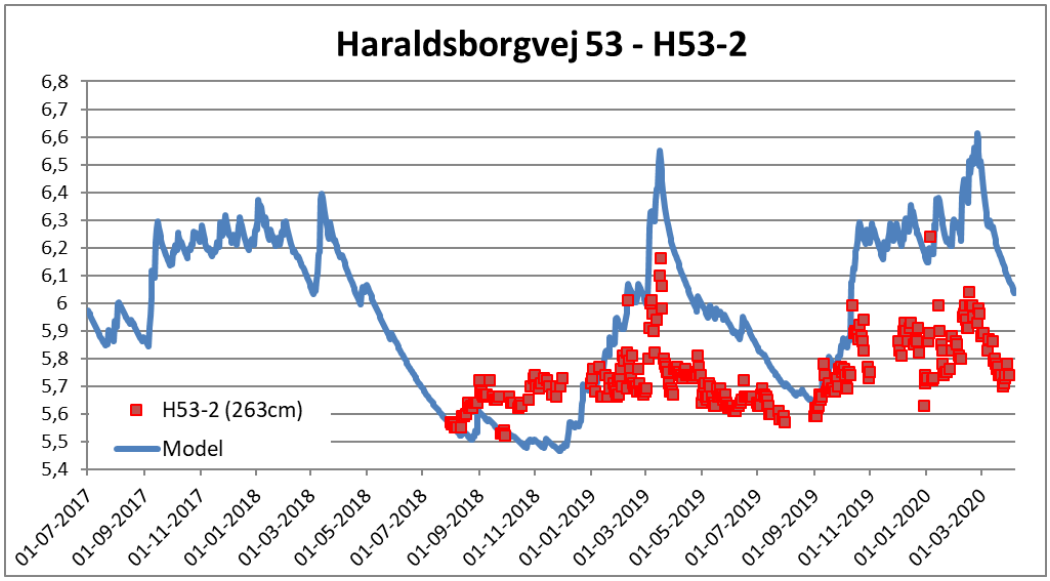

Valhalvej 65 - V65-1
8,6
8,5
8,4
8,3
8,2
8,1
8
7,9
7,8
7,7
7,6
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
6,9
6,8
6,7
6,6
6,5
6,4
6,3
6,2
V65-1 (200cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

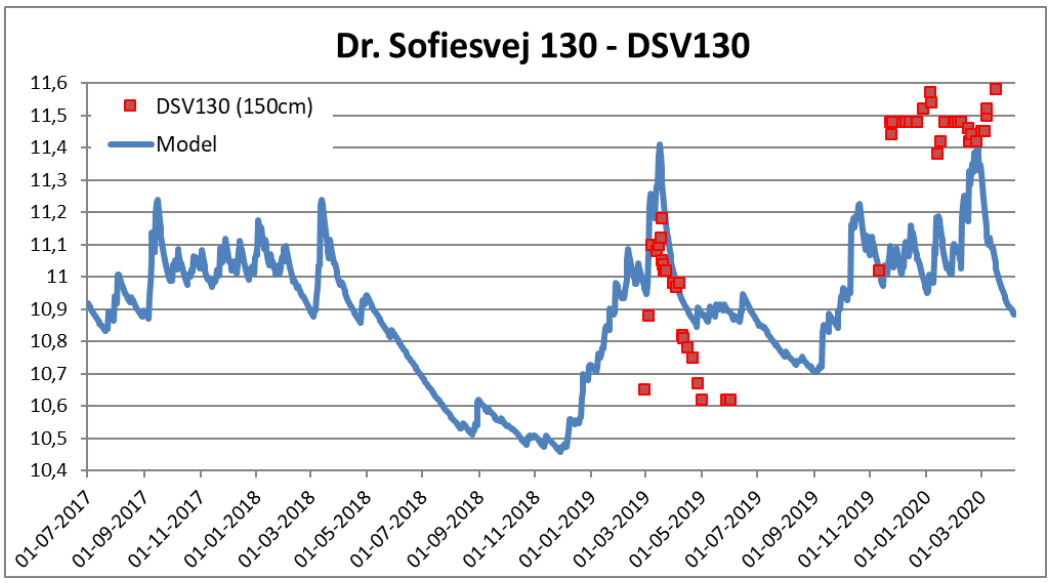

Valhalvej 65 - V65-2
8,2
8,1
8
7,9
7,8
7,7
7,6
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
6,9
6,8
6,7
6,6
6,5
6,4
V65-2 (203cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

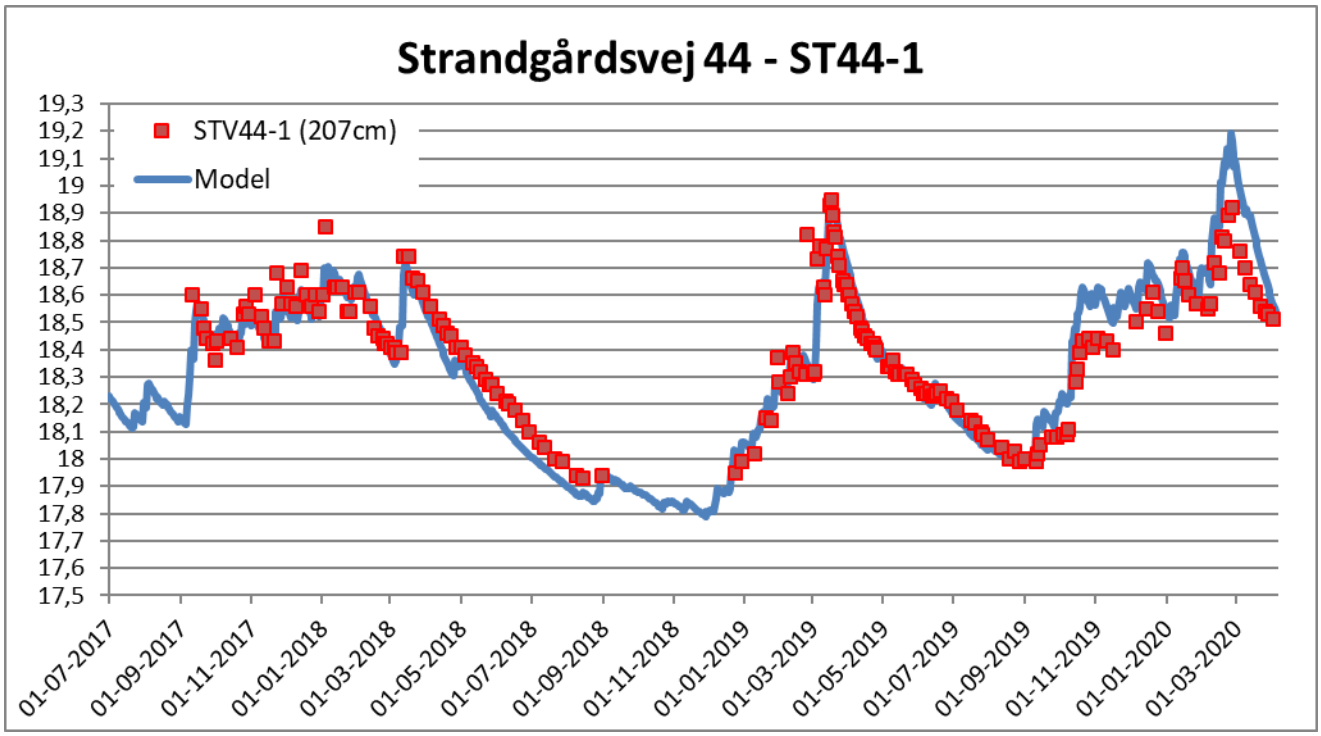

Haraldsborgvej 29 - H29-2
13,8
13,7
13,6
13,5
13,4
13,3
13,2
13,1
13
12,9
12,8
12,7
12,6
12,5
12,4
12,3
H29-2 (170cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

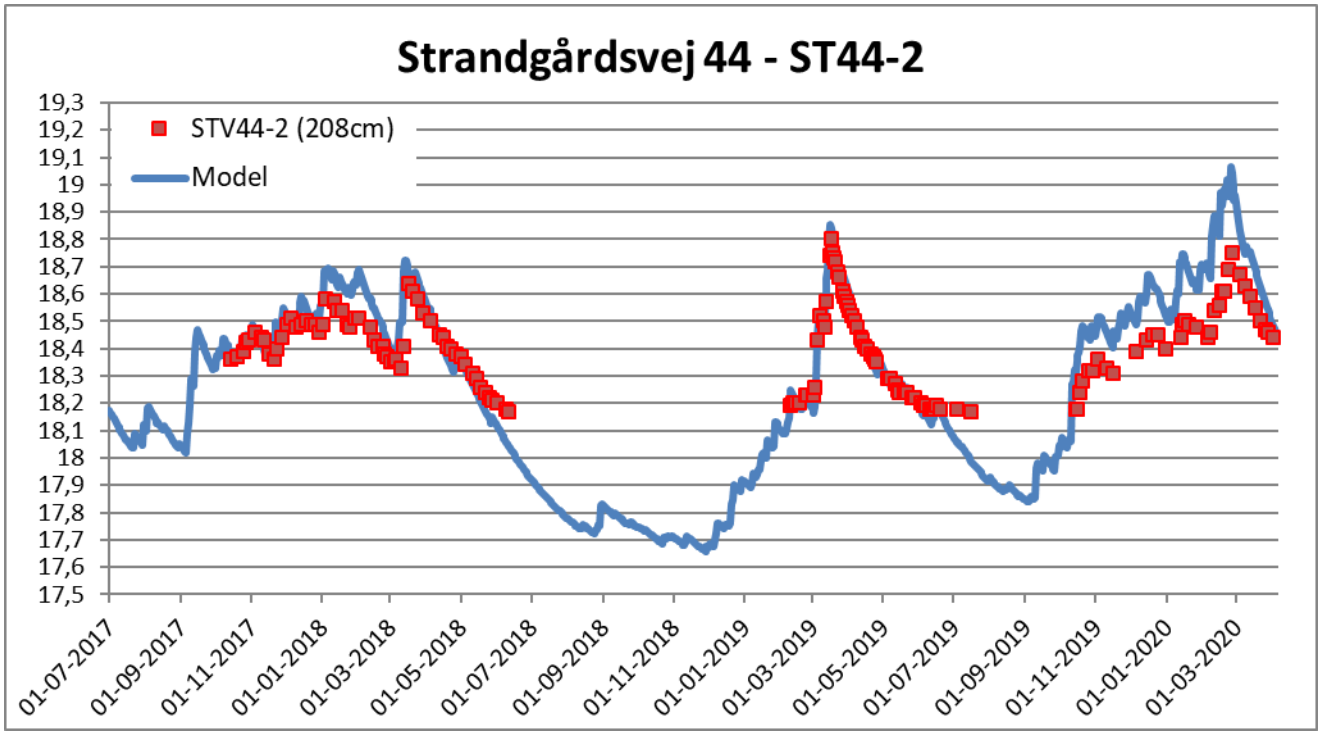

Haraldsborgvej 51 - H51
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
6,9
6,8
6,7
6,6
6,5
6,4
6,3
H51 (191cm)
Model
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020


Haraldsborgvej 53 - H53-1
H53-1 (213cm)
Model
7,6
7,5
7,4
7,3
7,2
7,1
7
6,9
6,8
6,7
6,6
6,5
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020


Haraldsborgvej 53 - H53-2
H53-2 (263cm)
Model
6,8
6,7
6,6
6,5
6,4
6,3
6,2
6,1
6
5,9
5,8
5,7
5,6
5,5
5,4
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020


Dr. Sofiesvej 130 - DSV130
DSV130 (150cm)
Model
11,6
11,5
11,4
11,3
11,2
11,1
11
10,9
10,8
10,7
10,6
10,5
10,4
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

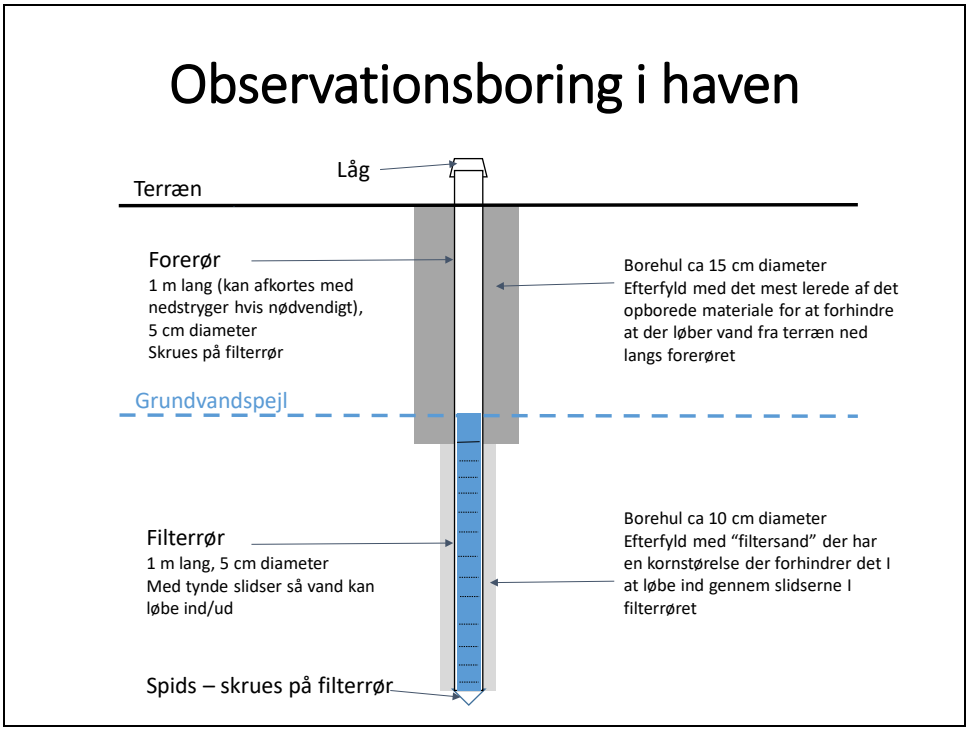

Strandgårdsvej 44 - ST44-1
STV44-1 (207cm)
Model
19,3
19,2
19,1
19
18,9
18,8
18,7
18,6
18,5
18,4
18,3
18,2
18,1
18
17,9
17,8
17,7
17,6
17,5
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020


Strandgårdsvej 44 - ST44-2
STV44-2 (208cm)
Model
19,3
19,2
19,1
19
18,9
18,8
18,7
18,6
18,5
18,4
18,3
18,2
18,1
18
17,9
17,8
17,7
17,6
17,5
01-07-2017
01-09-2017
01-11-2017
01-01-2018
01-03-2018
01-05-2018
01-07-2018
01-09-2018
01-11-2018
01-01-2019
01-03-2019
01-05-2019
01-07-2019
01-09-2019
01-11-2019
01-01-2020
01-03-2020

Bilag F: Grundvandsproblemer i haven?

Som følge af lukning af Haraldsborg Vandværk eller klimaændringer

Vejledning til grundejere i Haraldsborg området



Fugtproblemer i huset

Mange grundejere oplever problemer med fugt i kælder, fundament eller gulv. Det kan have mange forskellige årsager som f.eks. utætte vandrør, utætte kældervægge/gulve, utætte afløbsbrønde eller ledninger på grunden, vand fra kloak ved skybrud, eller højt overfladenært grundvand.

En række fagfolk, herunder bygningskonstruktører, kloakmestre, geoteknikere, ingeniører og arkitekter, kan være relevante for at identificere årsagen til problemet. *Denne her vejledning omhandler kun overfladenært grundvand*.

Stigende overfladenært grundvand

Det overfladenære grundvand stiger i disse år over hele landet, fordi nedbøren er stigende. Det har den været de sidste 30 år, og det vil fortsætte og forstærkes som følge af de igangværende klimaforandringer. Derudover kan indsatser for at tætne kloakrør og regnvandsledninger forårsage højere grundvand i lokalområder, fordi ledningerne så ikke længere fungerer som dræn. Endelig kan ophør af oppumpning af grundvand til vandforsyning nogle steder forårsage stigning i det overfladenære grundvand.

I Haraldsborg området har grundige undersøgelser vist, at en lukning af oppumpningen til Haraldsborg Vandværk forventes at medføre 5-10 cm stigning af grundvandet, mens klimaændringer henimod 2050 kan have en effekt, der er tre gange større.

Der er således god grund til, at grundejere er opmærksomme på stigende grundvand – også selvom problemet endnu ikke har vist sig i huset.

Pejlinger af overfladenær grundvandsstand

Dybden til det overfladenære grundvand kan bestemmes ved hjælp af pejleboringer. Som det fremgår af Vandgruppens pejlenetværk (Bilag A) varierer dybden til grundvandet hen over året med højst grundvandsstand om vinteren og forskelle fra år til år afhængig af nedbørsmængderne. Men dybden til grundvandet kan også variere betydeligt inden den enkelte grund, bl.a. på grund af den drænende effekt af rørledninger i vejen og omkring huset. Det er derfor nødvendigt at måle grundvandsstanden over en længere periode og på flere lokaliteter på grunden.

Pejleboringer - hvor og hvordan

- Lav 3-4 boringer fordelt omkring huset, så både områder mellem huset og rørtraceer og områder bag huset repræsenteres. Et kort over Fors' rørtraceer kan ses som Figur 4 (side 14).
- Lav boringerne som beskrevet i Vandgruppens vejledning (se Bilag A, side 40). Boringerne skal være så dybe, at de når ned under det øverste grundvandsspejl – typisk mellem 1½ og 2½ m. 3 m håndbor kan lånes hos Vandgruppen. Materialer koster ca. 300 kr. pr boring og kan købes hos ROTEK i Ishøj.
- Mål dybden til grundvandsspejlet i boringen. Hvis der er fugtproblemer eller vand i kælder, er et par målinger, der påviser grundvandsstand over kælderniveau eller fundamentniveau tilstrækkelig til at handling kraftigt bør overvejes her og nu. Ellers er det vigtigt at fortsætte med regelmæssige observationer gennem minimum en vintersæson, men helst 1-2 år inkluderende to vintre og en mellemliggende sommer. Ugentlige observationer er som regel tilstrækkelig, men hyppigere observationer er at foretrække i nedbørsrige perioder med stigende grundvandsstand.

Analyse af pejledata

- Få hjælp fra Vandgruppen til at sammenholde observationerne med data fra boringer, hvor der har været observationer siden 2017. Hvis observationerne er lavet i en vintersæson, som ikke har været særlig nedbørsrig, kan Vandgruppen hjælpe med at estimere, hvor høj grundvandsstanden ville have været i ekstra våde vintre som f.eks. 2019 og 2020.

Afværgeforanstaltninger – hvis der er for højt grundvand

Husejere kan godt have grundvandsspejl over kældergulvsniveau uden at have fugtproblemer. Hvis der er fugtproblemer, og det vurderes at fugten skyldes, at det overfladenære grundvand periodevis står for højt i forhold til kælder eller fundament, kan det være nødvendigt at lave afværgeforanstaltninger. Afværgeforanstaltninger kan være kollektive eller individuelle.

Kollektive løsninger

Afhængig af problemets oprindelse kan kollektive løsninger eksempelvis bestå af:

- Oppumpning af vand fra et dybereliggende grundvandsmagasin. Det er relevant nogle steder i landet, men vil grundet den geologiske opbygning i Haraldsborg området ikke have nogen betydelig effekt her.
- Etablering af ekstra drænledninger ved siden af de eksisterende kloak- og regnvandsledninger. Det vil formentlig kunne give en god sikring mod stigende grundvand forårsaget af øget nedbør og vil derfor være et virkemiddel, der bør undersøges nærmere i forbindelse med Roskilde Kommunes klimatilpasningsplan.

Fælles for de kollektive løsninger er, at der pt ikke er lovgivningsmæssig hjemmel til at gennemføre dem. Men et fælles initiativ fra Kommunernes Landsforening og DANVA (Dansk Vand- og Spildevandsforening) har anbefalet ændret lovgivning, som forhåbentlig med tiden vil muliggøre kollektive løsninger.

Individuelle løsninger

I tilfælde af højt grundvandsspejl og samtidige fugtproblemer vil den mest oplagte individuelle løsning være etablering af omfangsdræn. Det koster 250.000 – 500.000 kr. at etablere omfangsdræn omkring et hus med fuld kælder. Så hvis grundvandspejlinger viser, at der kun er problemer med højt grundvand ved den ene side af huset kan der spares mange penge ved kun at lave omfangsdræn de steder, hvor det er nødvendigt.