

# Forslag til fremtidigt grundvandspejlestationsnet for motorvejsstrækning gennem Silkeborg

Per Rasmussen, Lars Troldborg & Marianne B. Wiese

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER  
FOR DANMARK OG GRØNLAND,  
KLIMA-, ENERGI- OG BYGNINGSMINISTERIET



**GEUS**

# **Forslag til fremtidigt grundvandspejlestationsnet for motorvejsstrækning gennem Silkeborg**

Per Rasmussen, Lars Troldborg & Marianne B. Wiese

## Indhold

<b>1.</b>	<b>Indledning</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Status for det eksisterende pejlestationsnet</b>	<b>4</b>
2.1	Boringernes placering, formål og status .....	4
2.2	Hvad viser de indsamlede pejedata .....	7
2.3	Dublerende data .....	8
2.4	Typiske fejl på data .....	9
<b>3.</b>	<b>Danske og udenlandske erfaringer med grundvandspejlestationsnet</b>	<b>10</b>
<b>4.</b>	<b>Udvælgelse af monitoringsboringer</b>	<b>15</b>
<b>5.</b>	<b>Forslag til boringer i et fremtidigt pejlestationsnet</b>	<b>23</b>
<b>6.</b>	<b>Forslag til fremtidig procedure for fejlfinding og fejlretning</b>	<b>26</b>
<b>7.</b>	<b>Konklusioner og anbefalinger</b>	<b>28</b>
<b>8.</b>	<b>Referencer</b>	<b>29</b>
<b>Bilag 1</b>	<b>Statistik for pejetidsserier</b>	<b>30</b>
<b>Bilag 2</b>	<b>Eksempler på typiske fejl</b>	<b>31</b>

# 1. Indledning

I 2010 er der indgået et samarbejdsprojekt mellem Vejdirektoratet og GEUS med det overordnede formål gennem forskningsbaserede undersøgelser at frembringe ny viden om grundvandsforholdene af betydning for projektering, anlæg og drift af motorvejen gennem Silkeborg, herunder specielt at vurdere effekterne af klimaændringer på hydrologi og grundvand. Motorvejen og tilhørende konstruktion er nedsænket i forhold til terrænet på nogle strækninger.

I forbindelse med projekteringen og anlægsfasen af motorvejen er der etableret et pejlestationsnetværk med det formål at fastlægge de naturlige grundvandsforhold og vurdere afledte grundvandspåvirkninger under anlægsarbejdet. Pejlestationsnetværket er løbende udbygget til også at understøtte viden om en række §3 beskyttede områder.

Formålet med nærværende rapport er at præsentere et forslag til et fremtidigt permanent pejlestationsnet for grundvandets trykniveau i området omkring den nye motorvejsstrækning gennem Silkeborg på strækningen mellem Silkeborg Langsø og Nordre Højmarksvej.

Det fremtidige permanente pejlestationsnet skal kunne måle såvel naturlige som anlægsbetingede variationer i grundvandets trykniveau i tid og sted i området.

De indsamlede grundvandsdata skal eventuelt kunne indgå i en realtids modelsimulering og prognoser for grundvandsstande og vandløbsafstrømninger i forbindelse med for eksempel usædvanlige regnhændelser.

Forslaget til fremtidigt pejlestationsnet bygger på det eksisterende pejlestationsnet etableret i forbindelse med projekterings- og anlægsfasen af motorvejen.

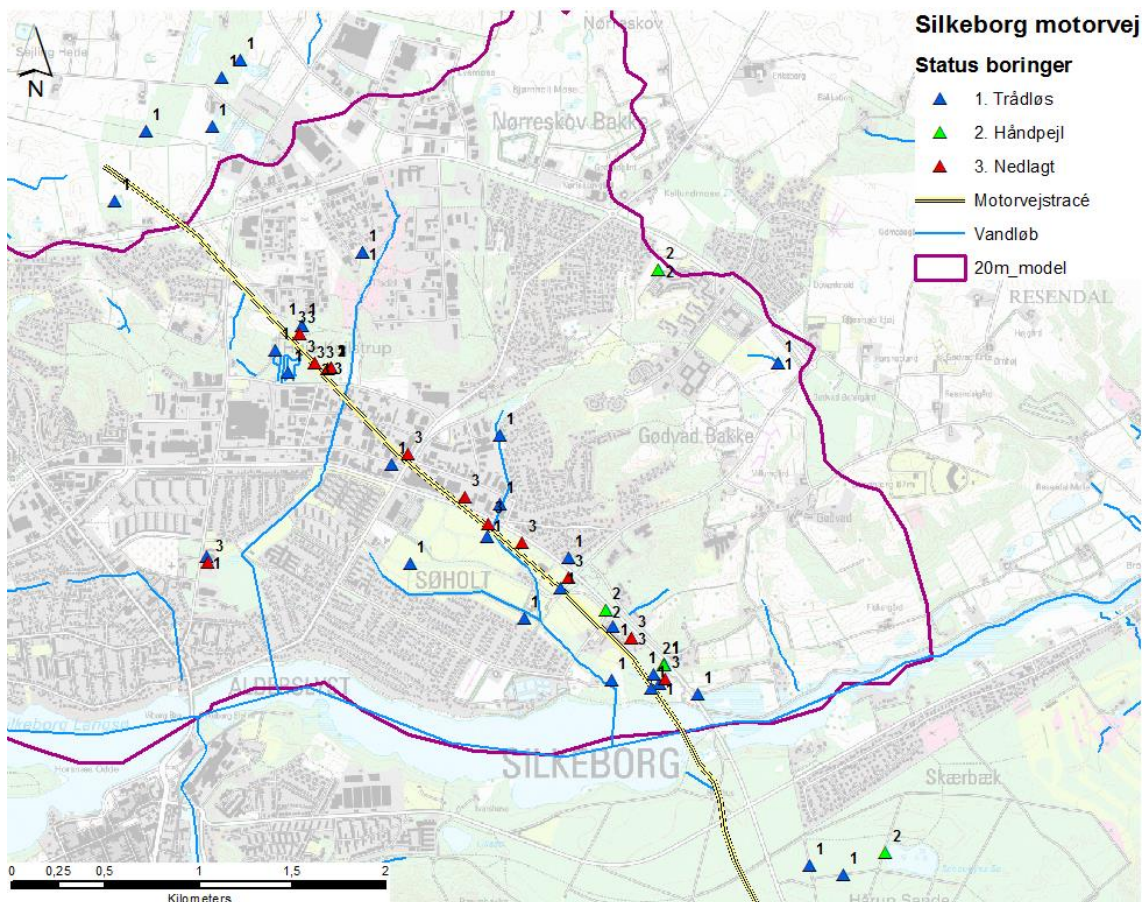
Der er beskrevet et forslag til en kvalitetssikrings protokol for automatisk indsamlede pejledata samt en procedure for fejlretning af disse data.

I denne rapport er der ikke behandlet typer og forslag til valg af tryktransducere, dataloggere, udstyr til datatransmission og databaser.

## 2. Status for det eksisterende pejlestationsnet

### 2.1 Boringernes placering, formål og status

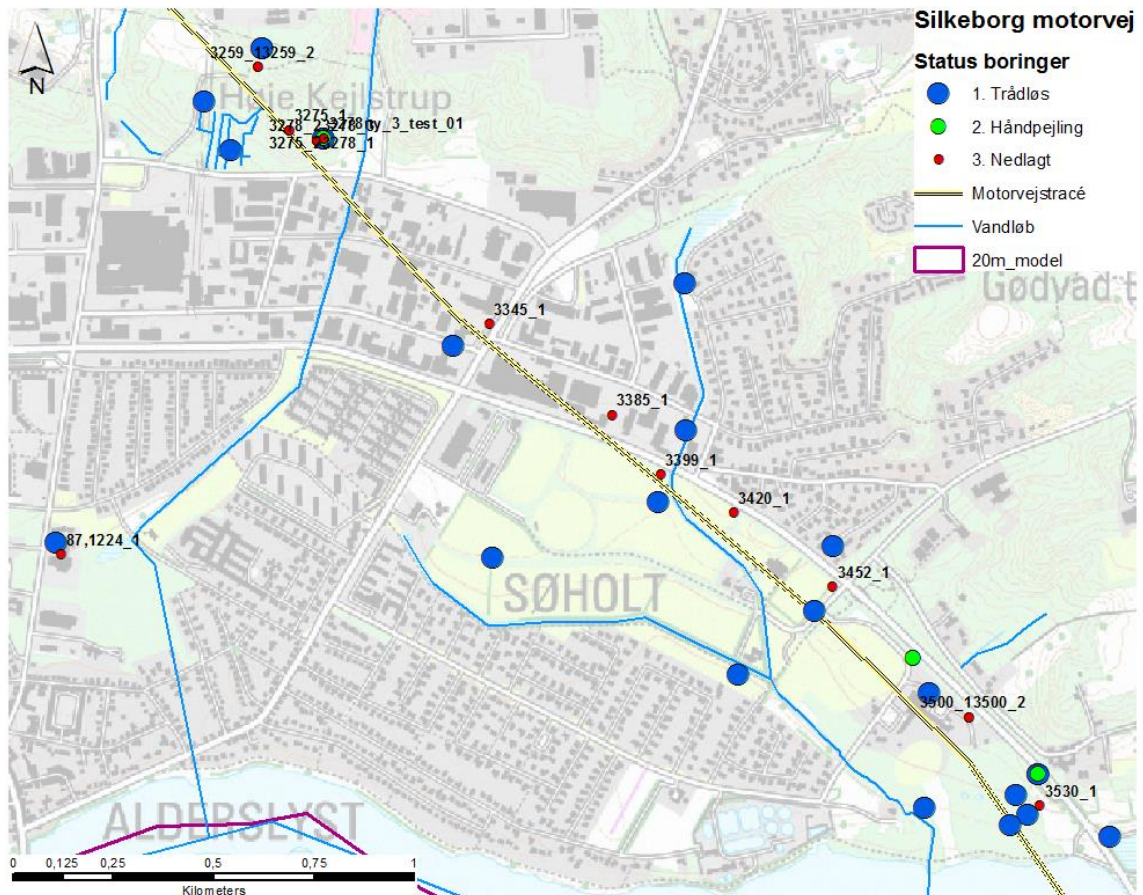
I anlægsfasen har der indgået i alt 57 boringer i et pejlestationsnet for grundvandets trykkniveau i området omkring den nye motorvejsstrækning gennem Silkeborg. De første pejleboringer blev sat i drift primo juli 2010, og senest ultimo februar 2014 blev nye boringer taget i brug. Hovedparten af boringerne er instrumenteret med automatisk vandstandsmåling og trådløs dataoverførsel (Figur 2-1).



Figur 2-1 Status for de enkelte pejleboringer

Der er løbende i anlægsperioden blevet etableret nye og nedlagt eksisterende pejleboringer under hensyntagen til muligheder og behov i anlægsfasen. 41 boringer var i drift medio 2015. Fra 34 af disse boringer sker der en automatisk trådløs dataoverførsel til en central database, og de resterende 7 boringer håndpejles (COWI 2014).

På Figur 2-2 ses at hovedparten af de nedlagte boringer var beliggende i eller meget tæt på motorvejstracéen, på nær boring 87.1224\_1 i den vestlige del af området. De nedlagte boringer er alle erstattet af nye boringer ud fra vurderinger af en mere hensigtsmæssig placering af erstatningsboringer (COWI 2014).

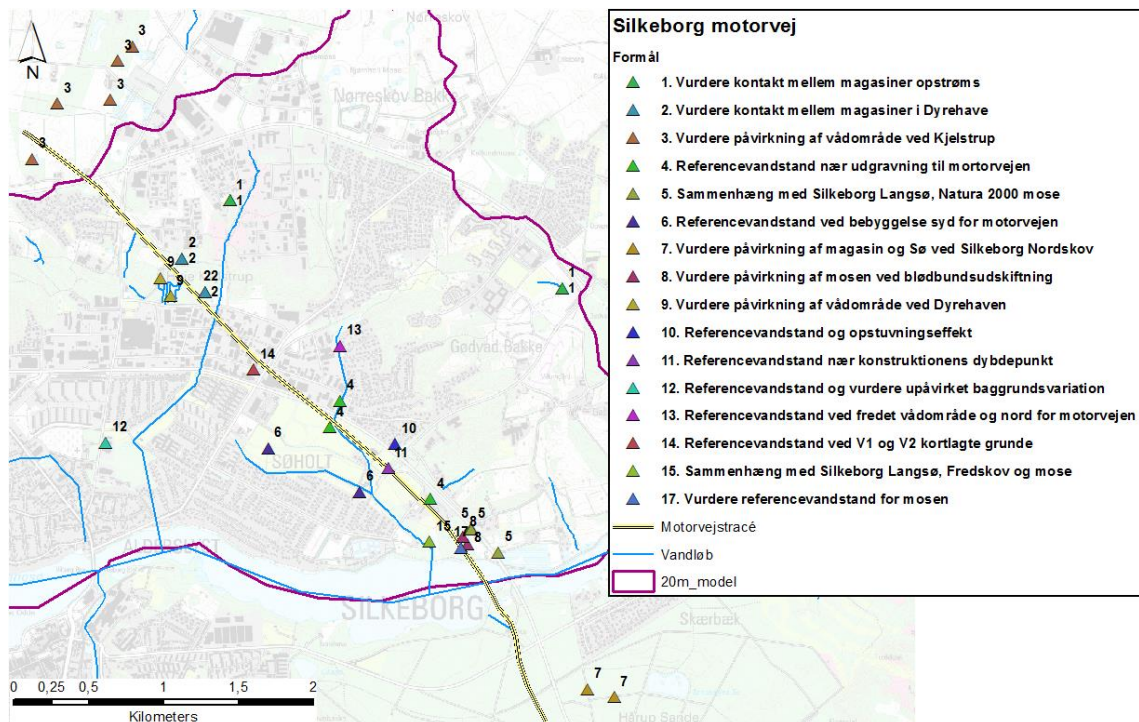


Figur 2-2 Boringsnumre for nedlagte pejleboringer

Pejleboringerne er opdelt på i alt 18 forskellige formål (COWI 2014). I Tabel 2-1 og på Figur 2-3 ses antallet og fordelingen af boringer på de enkelte formål. De fleste boringer har til formål at vurdere kontakten mellem øvre og nedre grundvandsmagasiner i området nord for motorvejstracéen og i Dyrehaven, og at vurdere en eventuel påvirkning af vådområder fra grundvandssænkninger udført i forbindelse med anlægsarbejdet. Endelig anvendes et antal pejleboringer til at kontrollere designvandstande nær udgravningen til motorvejen.

**Tabel 2-1 Formål med pejlestationer i eksisterende overvågningsnet. 'Antal total' angiver antallet af pejlestationer inden for hvert formål for alle stationer i hele anlægsperioden frem til medio 2015, og 'Antal drift' angiver tilsvarende antal for stationer i drift medio 2015 hhv. automatiske stationer (trådløs) og håndpejlede borer (COWI 2014)**

<b>Formål</b>	<b>Antal total</b>	<b>Antal drift trådløs</b>	<b>Antal drift hånd-pejling</b>
1 Vurdere kontakt mellem magasiner opstrøms	6	4	2
2 Vurdere kontakt mellem magasiner i Dyrehave	11	4	1
3 Vurdere påvirkning af vådområde ved Kjelstrup	5	5	0
4 Referencevandstand og designvandstand nær udgravning til motorvejen	10	3	2
5 Sammenhæng med Silkeborg Langsø, Natura 2000 mose, designvandstand for Gudenå broerne	4	3	1
6 Referencevandstand ved bebyggelse syd for motorvejen	2	2	0
7 Vurdere påvirkning af magasin og Sø ved Silkeborg Nordskov	2	2	0
8 Vurdere påvirkning af mosen ved blødbundsudskiftning	2	2	0
9 Vurdere påvirkning af vådområde ved Dyrehaven	2	2	0
10 Referencevandstand og designvandstand nær konstruktionens dybdepunkt	2	1	0
11 Referencevandstand og vurdere upåvirket baggrundsvariation	2	1	0
12 Referencevandstand ved V1 og V2 kortlagte grunde	2	1	0
13 Referencevandstand nord for motorvejen og opstuvningseffekt	1	1	0
14 Referencevandstand ved fredet vådområde samt nord for motorvejen og opstuvningseffekt	1	1	0
15 Sammenhæng med Silkeborg Langsø, Fredskov og mose	1	1	0
16 Vurdere påvirkning af Sø ved Silkeborg Nordskov	1	0	1
17 Vurdere referencevandstand for mosen	1	1	0
18 Sammenhæng med Silkeborg Langsø, Natura 2000 mose, designvandstand for Gudenå broerne. Påvirkning i forbindelse med blødbundsudskiftning	1	0	0
19 Formål ikke oplyst	1	0	0



Figur 2-3 Formål for pejlestationer i drift medio 2015, både boringer med trådløs datatransmission og boringer som håndpejles

De 34 pejlestationer i drift har tidsserier på mellem 1,4 og 4,9 års længde (Bilag 1). Dataopsamlingsfrekvensen er normalt 1 registrering pr time. Hovedparten af boringerne har i gennemsnit lidt under 24 målinger pr døgn, hvilket viser at der har været kortere eller længere udfald i måleperioden (Bilag 1).

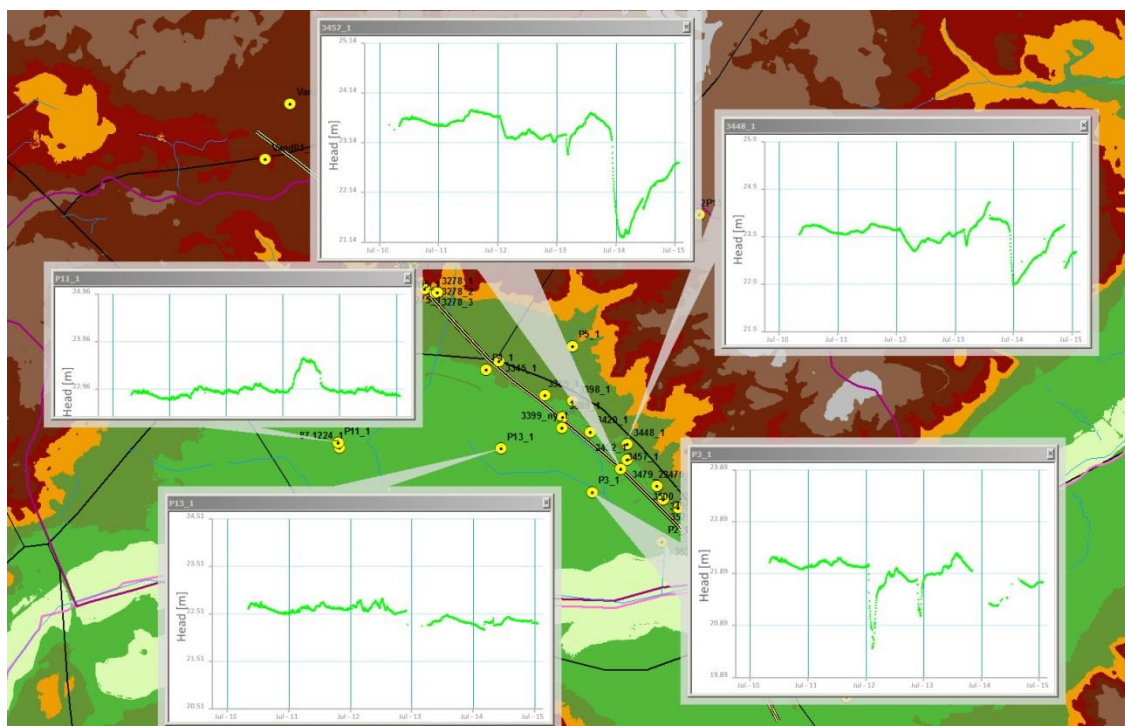
9 boringer med færre end 15 observationer er ikke medtaget i den sammenlignende analyse af pejetidsserier. Herudover er der 8 tidsserier som indeholder under 1 års observationer, disse tidsserier er heller ikke medtaget i den videre analyse. De korte tidsserier er alle fra perioden 2010 til 2011.

## 2.2 Hvad viser de indsamlede pejledata

De indsamlede pejledata viser alle at grundvandsstanden udviser en lille årlig amplitude på normalt under 0,2 m under naturlige forhold, det vil sige uden påvirkning fra grundvands-sænkninger. Pejledata fra de enkelte monitoringsboringer udviser markant forskellige afsænkingsniveauer afhængig af afstanden til de enkelte grundvandssænkninger (Figur 2-4).

Figur 2-4 viser et eksempel på en GIS applikation der er udviklet i nærværende projekt til visning af flere pejeserier samtidigt.





Figur 2-4 Eksempler på tidsserier for grundvandsstanden fra 5 udvalgte boringer

I afstande på op til 500 m fra motorvejstracéen ses påvirkning af grundvandsstanden fra afsænkninger foretaget i forbindelse med anlægsarbejdet, disse påvirkninger ses ikke 1000 m fra tracéen.

## 2.3 Dublerende data

Enkelte pejletidsserier fra forskellige boringer udviser et næsten identisk forløb. Dublerende boringer defineres her som boringer med (næsten) identiske tidsserier under naturlige forhold. Det vil sige at pejledata fra 2 eller flere boringer udviser sammenlignelige amplituder for årsvariationen i grundvandsstanden, at de udviser samme stigningsrate og fald i grundvandsniveauet hen over året, og at boringerne er placeret i samme grundvandsmagasin. Dog er det ikke i den senere vurdering af boringerne egnethed og relevans stillet som krav at den gennemsnitlige vandstandskote er den samme for at boringerne betegnes som dublerende. Vurderingen af om 2 eller flere boringer er dublerende er således en kvalitativ vurdering foretaget på baggrund af en visuel bedømmelse af de enkelte tidsserier.

Da der siden juli 2012 stort set kontinuert er foretaget grundvandssænkninger omkring en større eller mindre del af grundvandstracéen, er den periode hvor det er muligt at sammenligne den naturlige variation i grundvandsstanden mellem 2 boringer eller flere boringer ofte relativt kort.

## 2.4 Typiske fejl på data

Der er foretaget en manuel og visuel gennemgang af alle pejletidsserierne ved hjælp af programmet MIKE CUSTOMISED by DHI. Med dette program kan der let foretages en visuel inspektion af den enkelte tidsserie og tidsserier fra flere borer kan sammenholdes og vurderes, se for eksempel Figur 4-4 og 4-5.

De mest almindelige fejl som er konstateret ved gennemgangen af tidsserierne er:

- Forskydning af dataserie fra et registreringstidspunkt til det næste:
  - o Tryktransducere er flyttet op eller ned i boring
  - o Der er sket en beskadigelse af boring og udstyr under anlægsarbejdet
- Dataudfald i tidsserie
  - o Fejl på tryktransducer/datalogger
  - o Fejl ved datatransmission
  - o Beskadigelse af boring og udstyr som følge af anlægsarbejde
- Fejlbehæftede data
  - o Usandsynligt høje eller lave værdier
- Unaturlig variation i grundvandsstand
  - o Fejl på tryktransducer/datalogger
  - o Fejl ved datatransmission

I Bilag 2 ses eksempler på de typiske fejl der er konstateret ved gennemgangen af de enkelte tidsserier for grundvandsstande i området. Håndpejlinger ikke er ikke tilgængelige for GEUS via COWI's web service, hvorfor det ikke umiddelbart har været muligt at afgøre om der optræder drift i dataserierne (hvilket hyppigt ses ved automatisk registrering af grundvandsstande).

Det skal bemærkes at GEUS har til denne rapport anvendt data som dagligt er blevet opdateret med de seneste data, det vil sige, at der i data analysen optræder data som endnu ikke er blevet kvalitetssikret og eventuelt rettet af COWI. COWI håndpejler monitoringsboringerne og gennemfører for kvalitetssikring af pejledata i forbindelse med den halvårige afrapportering.

### 3. Danske og udenlandske erfaringer med grundvandspejlestationsnet

#### *Danske erfaringer*

I Danmark er der en lang tradition for at måle variationer i grundvandets trykniveau. De første pejleboringer og systematiske målinger af variationer i grundvandsstanden blev startet af Københavns Vandforsyning omkring 1887. Fra 1930'erne og 1940'erne startede også vandforsyningerne i Odense, Aarhus og Aalborg pejlestationsnet omkring deres kildepladser (Henriksen et al. 1996). Københavns Vandforsyning (nu HOFOR) har i mere en 50 år drevet et omfattende pejlestationsnet. Mange andre, også mindre vandværker driver i dag pejlestationsnet til overvågning af grundvandsstanden i deres interesseområder.

I forbindelse med den "Den internationale hydrologiske Dekade" (1965-74) blev der bl.a. i Karup-området etableret en lang række pejleboringer til belysning og modellering af markvandingens konsekvenser for grundvandsstanden. Senere fulgte Suså-projektet (1977-81) med bl.a. pejlestationsnet til brug for modellering og vurdering af vandindvindingsmuligheder i området. GEUS fortsatte monitoreringen af en række pejleboringer fra disse projekter ligesom flere amter i en årrække herefter drev pejlestationsnet.

I 2007 blev der som en del af den nationale grundvandsovervågning etableret et nationalt pejleprogram med det formål at overvåge grundvandets kvantitative tilstand, og samtidig påvise ændringer i grundvandsstanden forårsaget af evt. klimaændringer eller ændringer i vandindvindingen. Pejletidsserier fra det nationale pejlestationsnet afspejler generelt fire hydrogeologiske situationer (GEUS 2009):

- Terrænnære grundvandsmagasiner med hurtig og markant respons på nedbørsbegivenheder
- Dybere magasiner med en afdæmpet eller begrænset respons på årstidsvariationer i nedbørsfordelingen
- Vandindvindingsstrategi for en evt. nærliggende kildeplads
- Sæsonbetingede oppumpninger, f.eks. vanding.

Det nationale pejlestationsnet dækker desuden de mest udbredte hydrogeologiske forhold i Danmark.

I Danmark har GEUS udarbejdet en vejledning om "Pejlinger af grundvandsstanden i feltet", som omhandler procedure for håndpejling, pejling ved hjælp af dataloggere, databehandling og kvalitetssikring af data. GEUS har også udarbejdet en "Vejledning i indberetning af peyledata", der indeholder et afsnit om kvalitetssikring af peyledata. "Lokaliseringssvejledningen" fra GEUS omhandler blandt andet et koncept for fastsættelse af målepunkt for grundvandspejling i den enkelte boring. Til trods for at det i princippet skulle være ganske enkelt at fastsætte et målepunkt for en grundvandspejling er dette ofte en kilde til fejl ved måling af grundvandsstanden. De 3 vejledninger fremgår af referencelisten.

Som nationalt geologisk datacenter er GEUS optaget af at få registreret og dokumenteret hydrogeologiske boringsdata i den nationale database Jupiter. Dette for at sikre tilgængelighed og optimal udnyttelse af for eksempel geologiske data og pejledata.

#### *Udenlandske erfaringer*

Der er foretaget en søgning på nettet efter udenlandske erfaringer med design af pejlestationsnet og kvalitetssikring af data. Der er dels benyttet Google og dels Web of Science til denne søgning. Følgende søgeord blev anvendt: "*Design groundwater level monitoring network*".

#### *Design af pejlestationsnet*

Forskellige metoder kan anvendes ved design af et grundvandspejlestationsnet. Kombinationen af forskellige naturlige hydrogeologiske forhold og antropogene påvirkninger i et område kan lægges til grund for opdelingen af et område i zoner inden for hvilke variationen i grundvandsstanden forventes at være ensartet. Dette i modsætning til mellem zonerne, hvor der kan forventes en anderledes variation i grundvandsstanden. Et eksempel på denne fremgangsmåde anvendt for Beijing Plain er beskrevet af Zhou et al. (2013).

Prinos et al. (2002) anvender en statistisk tilgang til design af et reeltids pejlestationsnet for det sydlige Florida bestående af 4 elementer: 1) der foretages en statistisk sammenligning af gennemsnitlige månedlige maksimumsværdier for grundvandsstanden med månedsnedbør med henblik på at identificere de boringer som tydeligst viser en sammenhæng mellem en tørkeperiode og et fald i grundvandsstanden, 2) der anvendes en regressionsanalyse af daglige vandstandsmålinger til at vurdere hvilke boringer som er mest repræsentative for de enkelte grundvandsmagasiner, på den måde kan der også eventuelt foretages en underopdeling af de enkelte grundvandsmagasiner i zoner med forskellige karakteristika, 3) der foretages en statistisk test af trends i grundvandets trykniveau, og 4) der anvendes en standard beskrivende statistik for pejledata på borings- eller filterniveau.

I NGWNM (2013) fra USA går man lidt videre med en gruppering af monitoringsboringerne inden for et givent overvågningsområde, fx et afgrænset grundvandsmagasin. Boringerne opdeles efter 3 formål: baggrundsovervågning, overvågning i områder med forventede ændringer i grundvandsstanden (formodet antropogen påvirkning af grundvandsspejlet) og overvågning i områder med dokumenterede ændringer (dokumenteret antropogen påvirkning af grundvandsspejlet). Og inden for hvert af de 3 formål sker der også en opdeling af boringerne i baggrundsovervågning, trend monitoring og "rygrads"-boringer. Boringerne til baggrundsovervågning måles med lav frekvens med det formål at monitorere naturlige langtidsudviklings tendenser i områder uden antropogen påvirkning. I boringer til trendovervågning foretages en hyppig registrering af grundvandsstanden for overvågning af udviklingstendenser og sæsonvariationer. Da boringer til trend overvågning opfattes som særligt betydningsfulde udvælges en del af disse boringer som "rygrads"-boringer, som de vigtigste med hensyn til sikring af en kontinuert registrering.

### *Kvalitetssikring af grundvandspejledata*

Post et al. (2013) giver en grundig gennemgang af klassiske faldgruber ved målinger af grundvandsstanden.

U.S. Geological Survey (USGS) beskriver deres overvejelser omkring præsentation af grundvandspejledata online. Præsentation af fejlbehæftede data kan være problematisk af 2 grunde, dels kan det lede til forkerte beslutninger og dels kan det forringe troværdigheden af de øvrige data, som for langt hovedpartens vedkommende er data af god kvalitet (Hirsch 2000).

USGS's tilgang til at sikre online data af god kvalitet er dels at benytte software programmer til automatisk at detektere og forhindre fejlbehæftede data i at blive præsenteret online, og dels hyppig manuel inspektion af data fulgt op af hurtig sletning af dårlige data. Ved datapræsentationen skelnes der ved hjælp af 2 signaturer mellem kvalitetssikrede og godkendte data og ikke-godkendte data (USGS 2003).

USGS opererer med 3 typer tærskelværdier ved det automatiske tjek for fejl i data: 1) den absolutte værdi for en måling, 2) ændringstakten mellem den aktuelle måling for den forudgående måling og 3) den absolutte forskel mellem den aktuelle måling for den forudgående måling. Derudover opererer USGS med 2 niveauer for alvorligheden af fejlmålinger: 1) Kritiske fejl og 2) Ikke-kritiske fejl (USGS 2003).

### *Software*

Der findes en række softwarepakker på markedet til håndtering af hydrologiske data, blandt andet disse:

- MIKE CUSTOMISED by DHI (<http://www.mikecustomisedbydhi.com/>)
- AQUARIUS Time-Series by Aquatic Informatics Inc. (<http://aquaticinformatics.com/>)
- Hydstra / WISKI by Kisters (<http://kisters.com.au/>)

Siden 2012 har USGS benyttet AQUARIUS til kontrol og opretning af hydrologiske data i forbindelse med præsentation af disse online. I AQUARIUS kan antallet af godkendelses niveauer og datakvalitets niveauer fastsættes af brugeren.

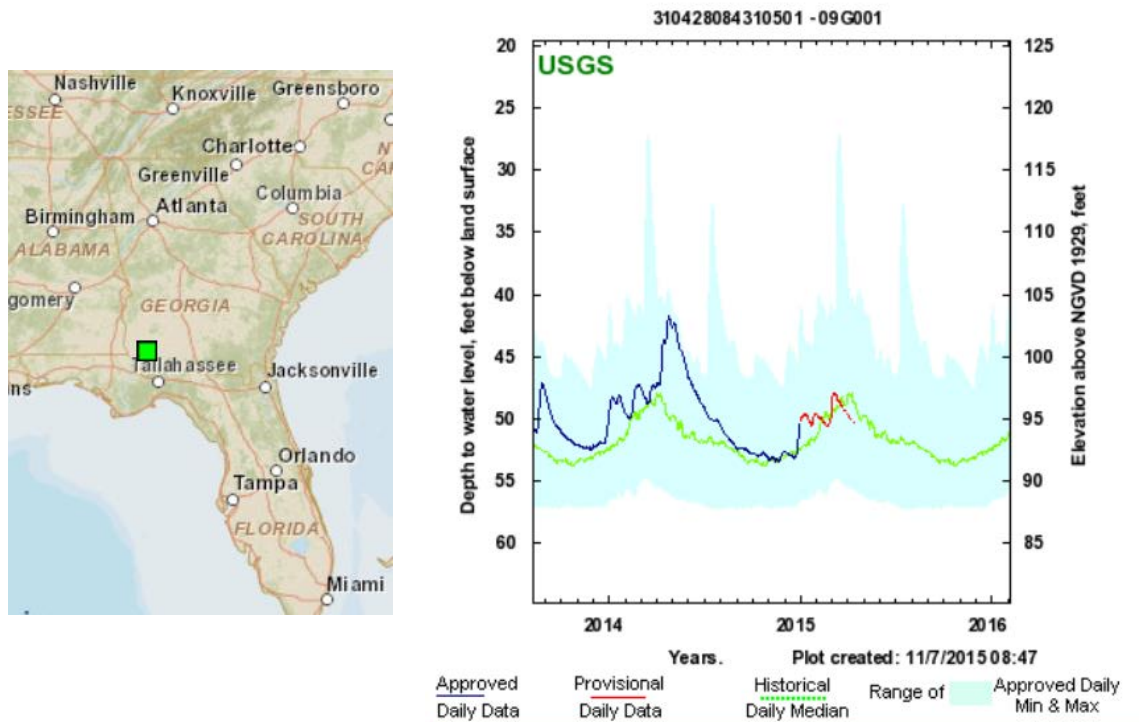
Tilsyneladende anvender USGS og AQUARIUS ikke softwareprogrammer til en automatisk fejlretning af data. Derimod har software som AQUARIUS veludviklede faciliteter til manuelt at korrigere data, herunder samtidig visualisering af tidsserier af rådata, felldata (håndpejlinger) og korrigerede data.

MIKE CUSTOMISED fra DHI og i Hydstra/WISKI fra Kisters indeholder også adskillige værktøjer til fejlretning og dataopretning.

I nærværende projekt er der implementeret en rutine i MIKE CUSTOMISED til flagning af data for høj absolut værdi (svarende til flag "H" i tabel 6-1). MIKE CUSTOMISED brugergrænseflade for flagning af data med usandsynlig hurtig stigning i vandstand eller med meget lille ændring i vandstand over en længere periode er forsøgt anvendt uden held.

### Online præsentation af pejledata

USGS og Islands meteorologiske institut (Iceland Met Office) driver stationsnet med kontinuerlige målinger af grundvandets trykniveau, som præsenteres online på deres hjemmesider (<http://groundwaterwatch.usgs.gov> og <http://en.vedur.is>) (Figur 3-1 og 3-2).



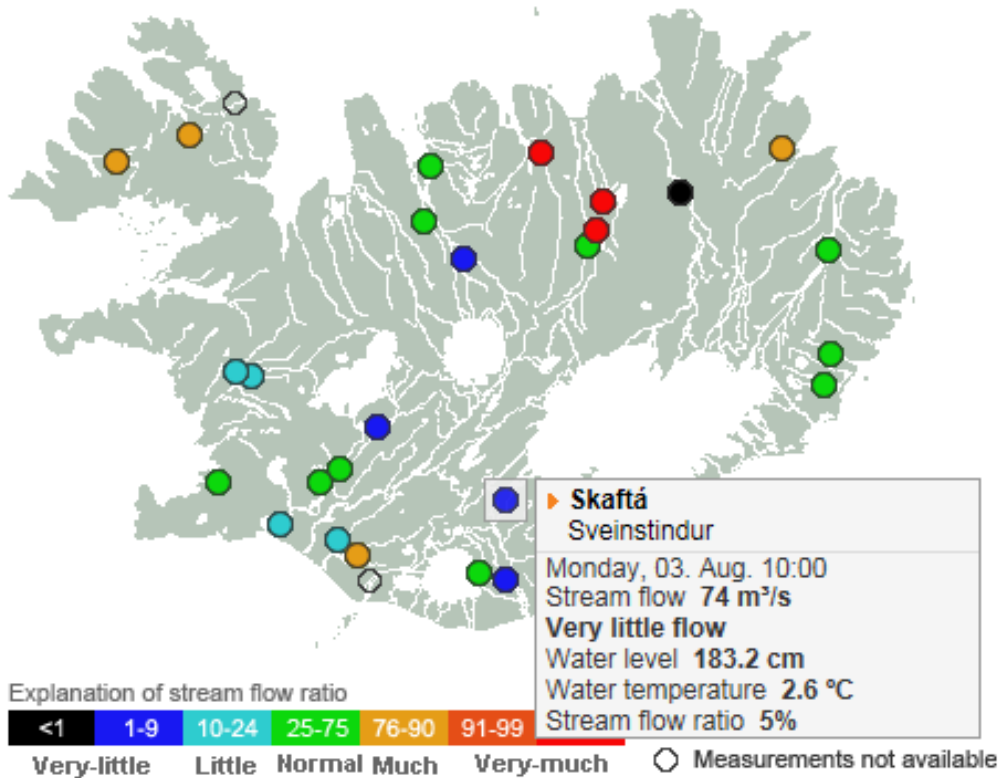
Figur 3-1 Online pejledata fra en grundvandsboring i Decatur County, Georgia, USA (Site ID: 310428084310501, Site name: 09G001, aquifer: Upper Floridan Aquifer: <http://groundwaterwatch.usgs.gov/AWLSites.asp?S=310428084310501&ncd>)

I Danmark findes 1 boring med online præsentation af grundvandspejledata, Tinglevboringen: <http://www.tinglevboringen.dk>. Stationen drives af Naturstyrelsen (der er problemer med datavisningen i skrivende stund).

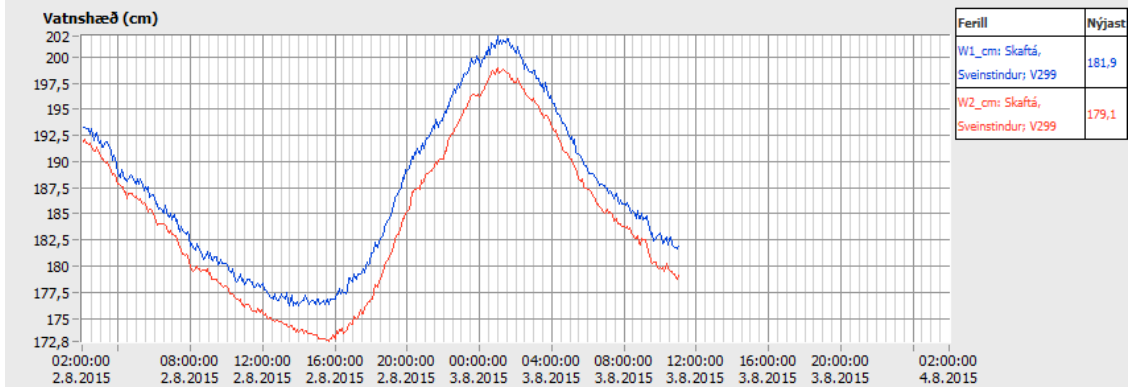
Det har ikke ved en simpel søgning på internettet været muligt at finde eksempler og beskrivelser af online grundvandspejlestationsnet fra fx England, Tyskland og Frankrig.

## Stream flow ratio

Preliminary results



Suðurland: Skaftá við Sveinstind



Figur 3-2 Online peyledata fra Skaftá, Island: <http://en.vedur.is> (vatnshæð = vandhøjde)

## 4. Udvalgelse af monitoringsboringer

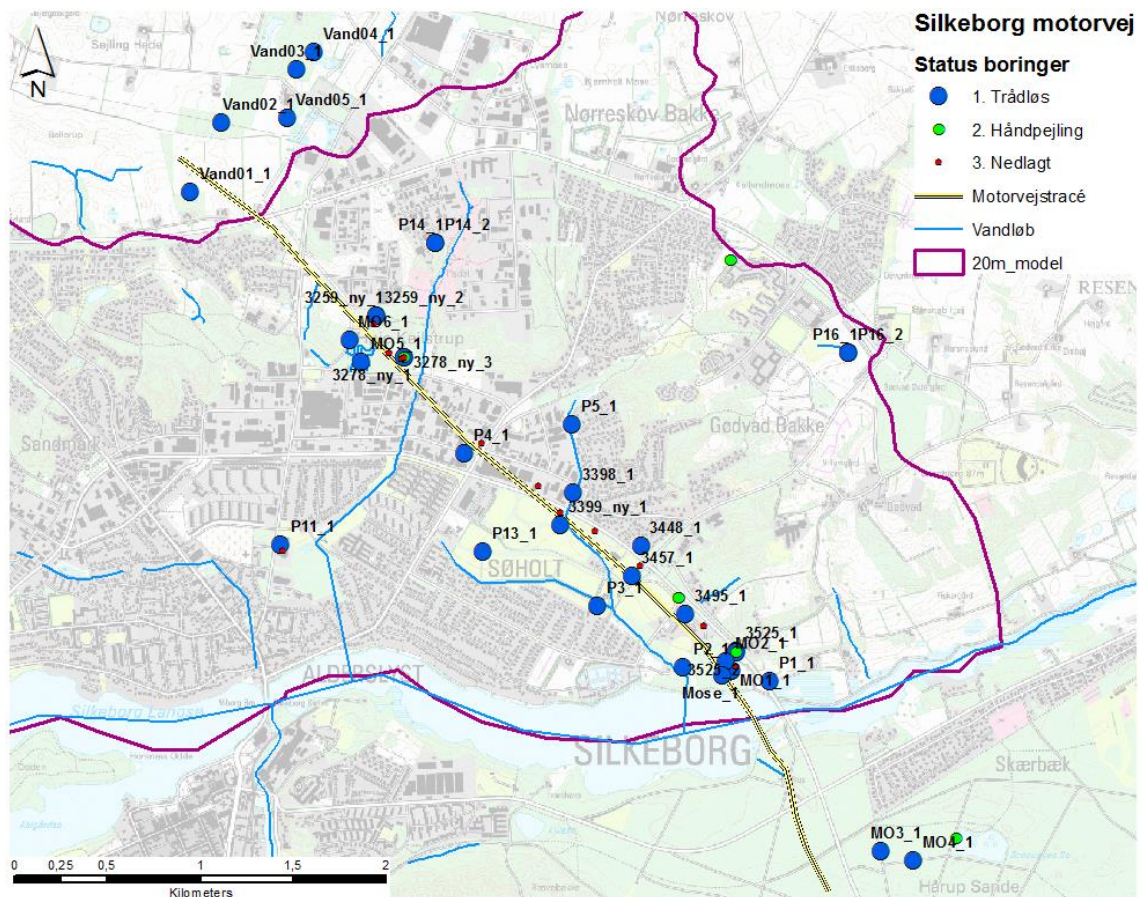
Udvælgelse af pejleboringer i et revideret pejlestationsnet er foretaget ud fra en række kriterier vedrørende placering i forhold til motorvejstracéen, hydrogeologiske forhold og kvaliteten af de eksisterende dataserier.

Mere konkret er der anvendt følgende kriterier for udvælgelse af boringer til revideret monitoringsnet:

- Placering i forhold til tracé: tæt på tracé, 200-500 m fra tracé (begrænset påvirkning fra grundvandssænkninger), længere fra tracé (upåvirket af grundvandssænkninger)
- Hydrogeologiske forhold: terrasse, øvre Kvartær, øvre Prækvartær
- Boringer med lange tidsserier
- Boringer med flere filtre
- Eksisterende pejleboringer som sorteres fra:
  - o dublerende boringer
  - o boringer i eller meget tæt på tracé
  - o boringer udenfor 20-m-model området
  - o boringer med korte tidsserier
  - o ringe informationsniveau i eksisterende tidsserie

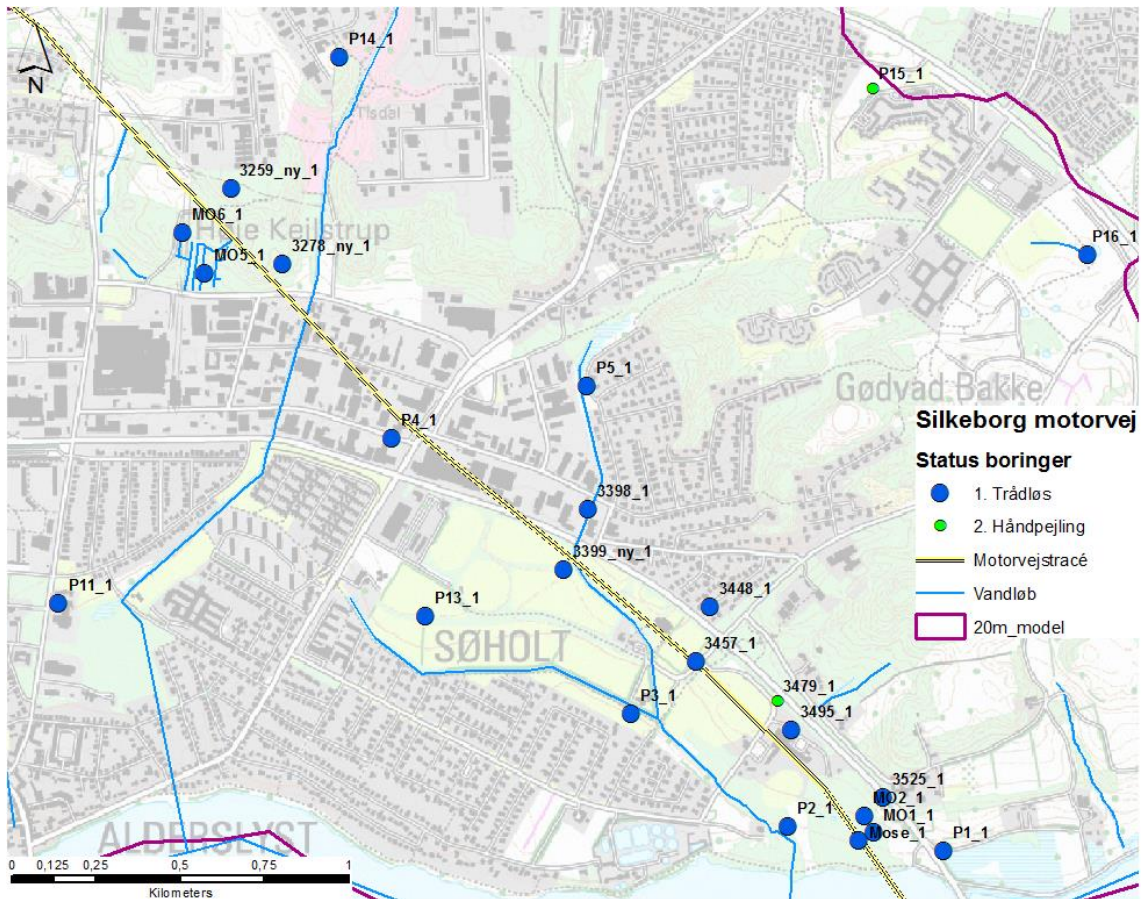
De eksisterende boringer Vand\_01 til Vand\_05 nordvest i området og boringerne MO3, MO4 og SOE\_SN beliggende mod syd er alle placeret udenfor for 20-m-modelområdet og er derfor udeladt i den videre vurdering (Figur 4-1).



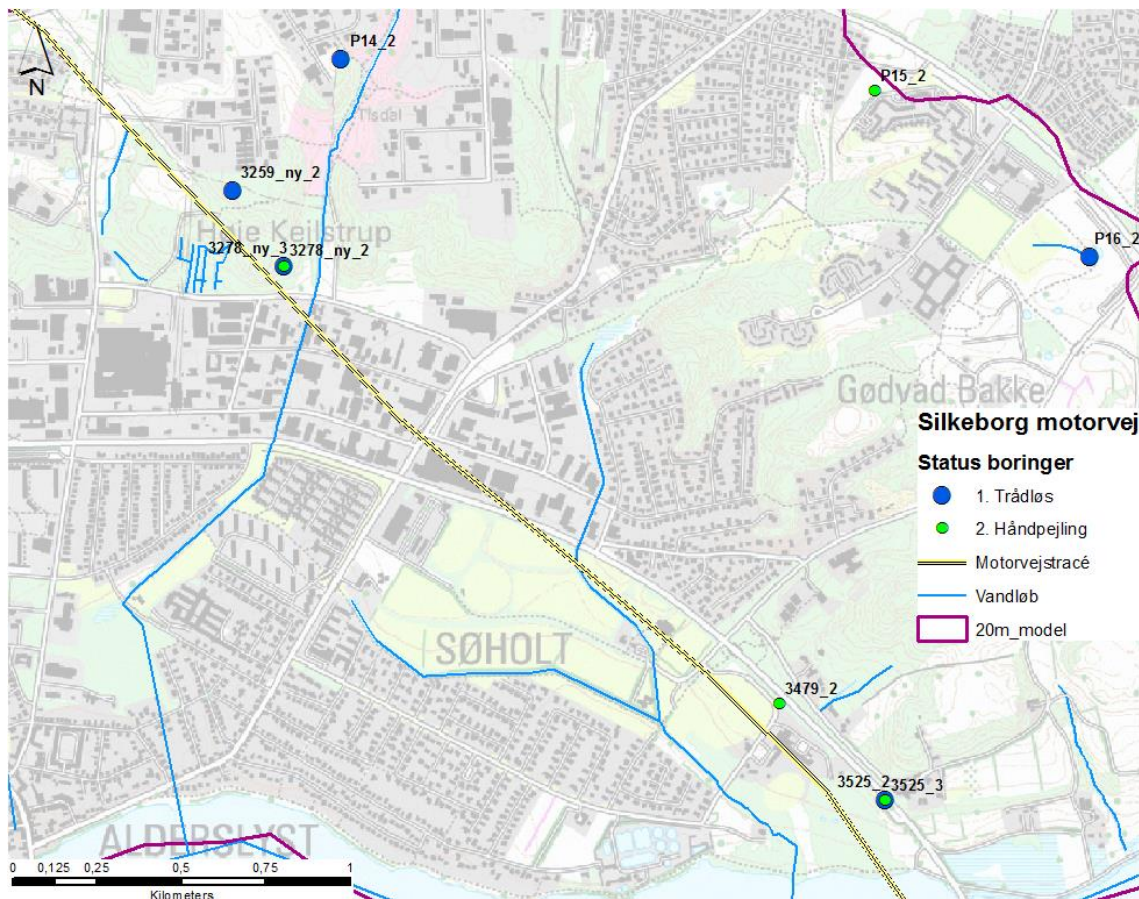


Figur 4-1 Alle aktive borer med trådløs dataoverførsel. Den sidste del af boreringsnummeret ”\_1”, ”\_2” og ”\_3”, angiver filternummeret i den pågældende boring

På Figur 4-2 ses placeringen af de aktive monitoringsboringer indenfor 20-m-modelområdet. I Figur 4-3 er der zoomet ind på borer med mere end 1 filter.



Figur 4-2 Aktive monitorings boringer/lokaliteter med mindst 1 filter placeret indenfor 20-m-modelområdet



Figur 4-3 Placering af monitoringsboringer med 2 eller 3 filtre

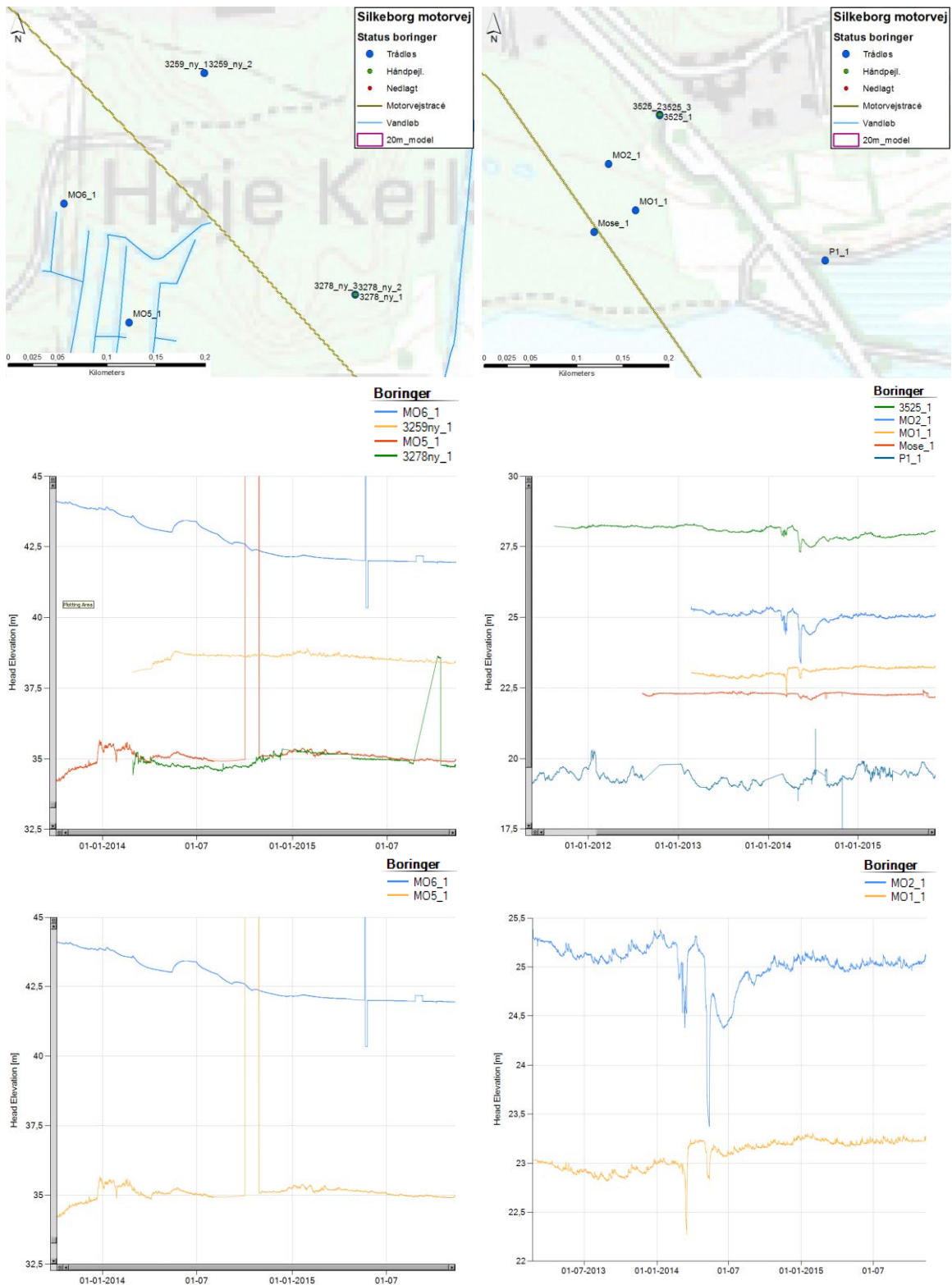
Indenfor modelområdet findes 24 monitoringsboringer med mindst 1 filter. Heraf er 22 boringer udbygget med trådløs dataoverførsel og 2 boringer håndpejles udelukkende. Af de 24 boringer er der 5 boringer med 2 filtre og 3 boringer med 3 filtre.

En gennemgang af pejleserier fra boringer med mere end 1 filter viser at der er længere tidsserier på mellem 1,4 og 4,2 års længde fra 5 af de 7 boringer. Fra boring P15 og 3479 er der kun foretaget ganske få håndpejlinger (Bilag 1). De øvrige 5 boringer (P16, P14, 3525, 3278\_ny og 3259\_ny) ses at repræsentere forskellig lithologi, dybde for filterplacering, grundvands trykniveau og områder med henholdsvis opadrettet og nedadrettet gradient (Tabel 4-1).

**Tabel 4-1** Monitoringsboringer med mere end 1 filter. Kolonnen 'Gradient' angiver om der er opadrettet eller nedadrettet gradient i boringen

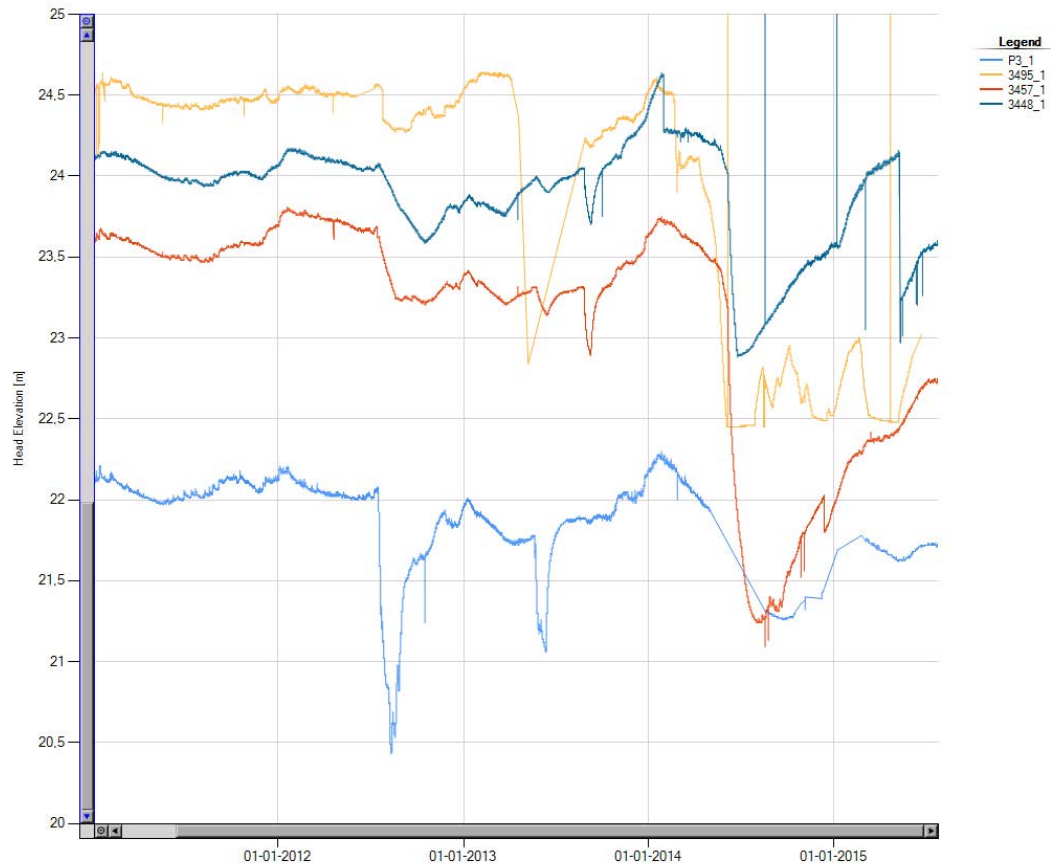
Bor.nr.	Filter	Filter-top m DVR90	Filter-bund m DVR90	Moni-tering	Lithologi	For-mål nr	Antal obs	Gens. Vsp kote	Gra-dient
P16_2	2	69,80	55,80	Trådløs	DS	1	33072	67,25	ned
P16_1	1	39,80	33,80	Trådløs	GS	1	34548	43,15	
P15_2	2	67,50	52,50	Håndpejl.	DS	1	10	52,25	ned
P15_1	1	44,50	22,50	Håndpejl.	GS	1	10	47,30	
P14_2	2	60,10	45,10	Trådløs	DS	1	31112	52,00	ned
P14_1	1	35,10	22,10	Trådløs	GS	1	31001	43,65	
3525_3	3	27,30	26,60	Håndpejl.	DS	5	12	28,10	ned op
3525_2	2	18,30	17,60	Trådløs	GS	5	32455	27,40	
3525_1	1	6,60	4,60	Trådløs	GI/GL	5	32456	28,05	
3479_2	2	21,80	20,80	Håndpejl.	DS	4	3	26,40	Ned
3479_1	1	7,80	5,80	Håndpejl.	GS/GL	4	3	25,85	
3278_ny_3	3	43,20	42,50	Trådløs	DS-øvre	2	4465	43,15	ned
3278_ny_2	2	40,00	38,00	Håndpejl.	GS/GI	2	9	38,70	
3278_ny_1	1	33,00	31,00	Trådløs	GS-nedre	2	10565	34,90	
3259_ny_2	2	41,10	39,10	Trådløs	DS/GS-	2	21662	44,00	ned
3259_ny_1	1	32,90	30,90	Trådløs	GS-nedre	2	21664	38,65	

Især i området ved Høje Kejlstrup og i området ved tracéen lige nord for Silkeborg Langsø ses en tæt koncentration af pejleboringer. I disse to områder vil der være særligt fokus på at undersøge om der er dublerende boringer med henblik på at reducere antallet af boringer (Figur 4-4 og 4-5).



Figur 4-4 Monitoringsboringer i området omkring Høje Kejlstrup (figurer til venstre) og nord for Silkeborg Langsø (figurer til højre)

Figur 4-5 viser et eksempel på 2 dublerende boringer, 3448 og 3457



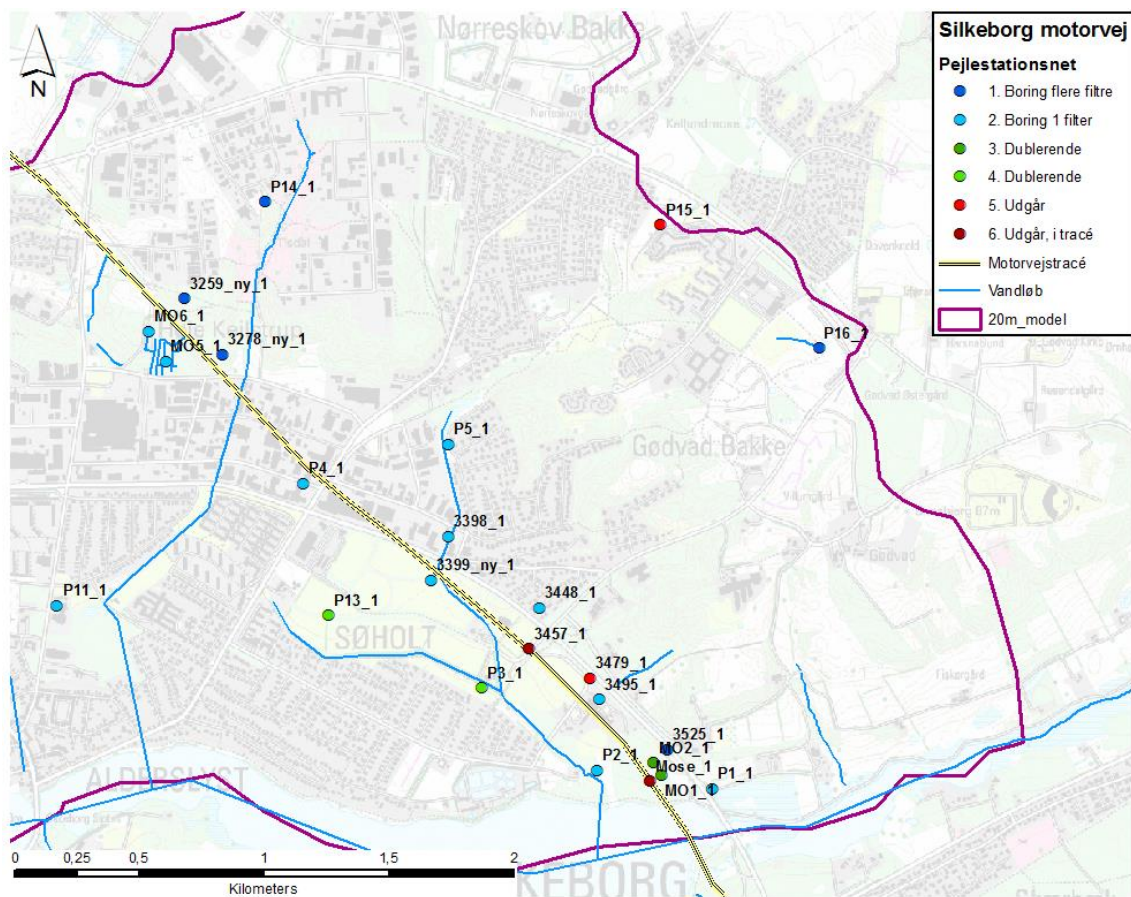
Figur 4-5 Eksempel på 2 dublerende boringer 3448 og 3457

En gennemgang af monitoringsboringer med 1 filter i forhold til ovenstående kriterier for udvælgelse af boringer til et fremtidigt pejlestationsnet viser at:

- Boringerne 3457\_1 og Mose\_1 ligger i eller meget tæt på motorvejstracéen
- Boringerne P3\_1 og P13\_ er dublerende
- Boringerne MO1\_ og MO2\_1 er dublerende
- Boringerne 3479 og P15 er kun håndpejlet få gange, og der er derfor kun meget få data fra disse boringer (boringer med 2 filtre)

Af de parvis dublerende boringer foreslås udvalgt en af de 2 boringer fra hvert boringspar.

De øvrige aktive monitoringsboringer vil være velegnede til et fremtidigt stationsnet (Figur 4-6).



Figur 4-6 Aktive monitoringsboringer velegnede til et fremtidigt stationsnet (blå signatur), dublerende boringer (grøn signatur), og ikke-velegnede boringer (rød signatur)

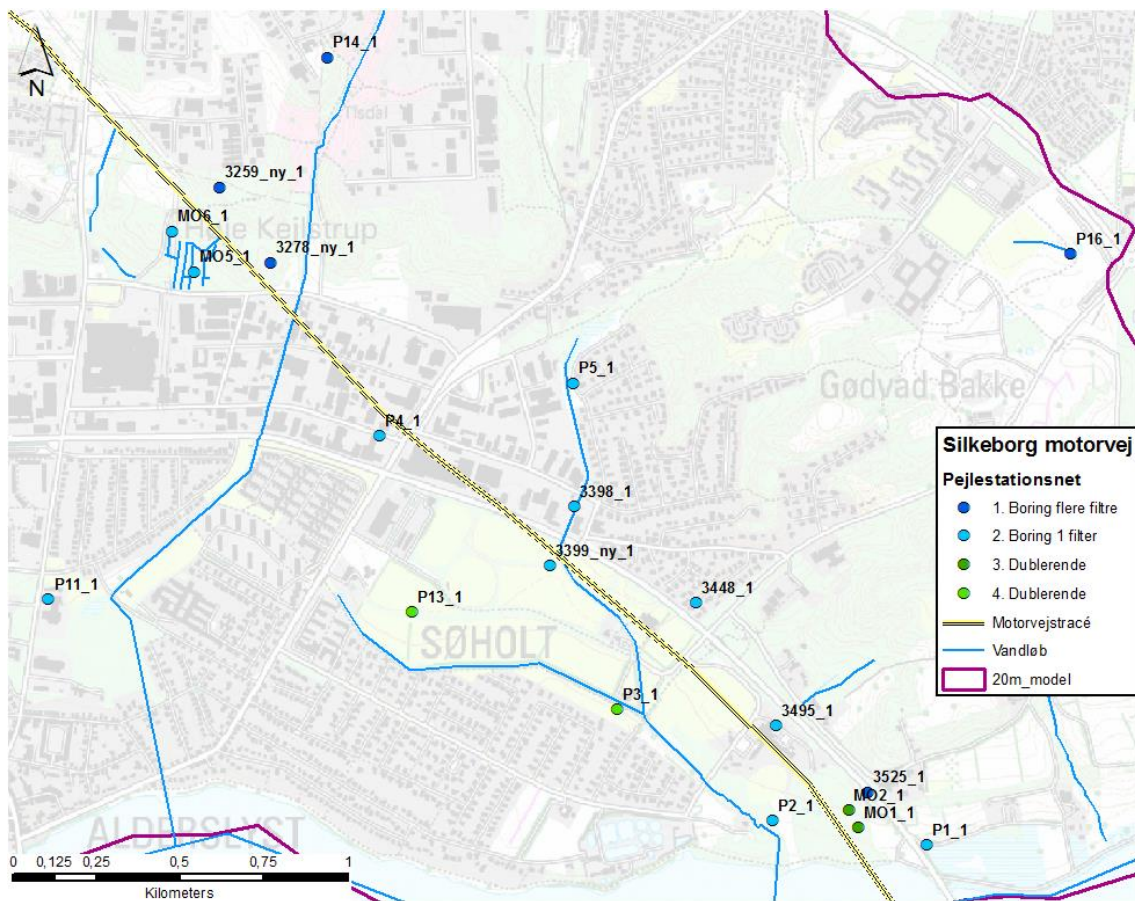
## 5. Forslag til boringer i et fremtidigt pejlestations-net

Baseret på gennemgangen af de eksisterende aktive monitoringsboringer foreslås det at der indgår 18 boringer i et fremtidigt pejlestationsnet. 3 af disse boringer indeholder 2 filtre og 2 boringer indeholder 3 filtre, det vil sige i alt 25 filtre. Heraf er 2 gange 2 boringer dublerende, 2 af disse 4 boringer udvælges (Tabel 5-1, Figur 5-1 og 5-2).

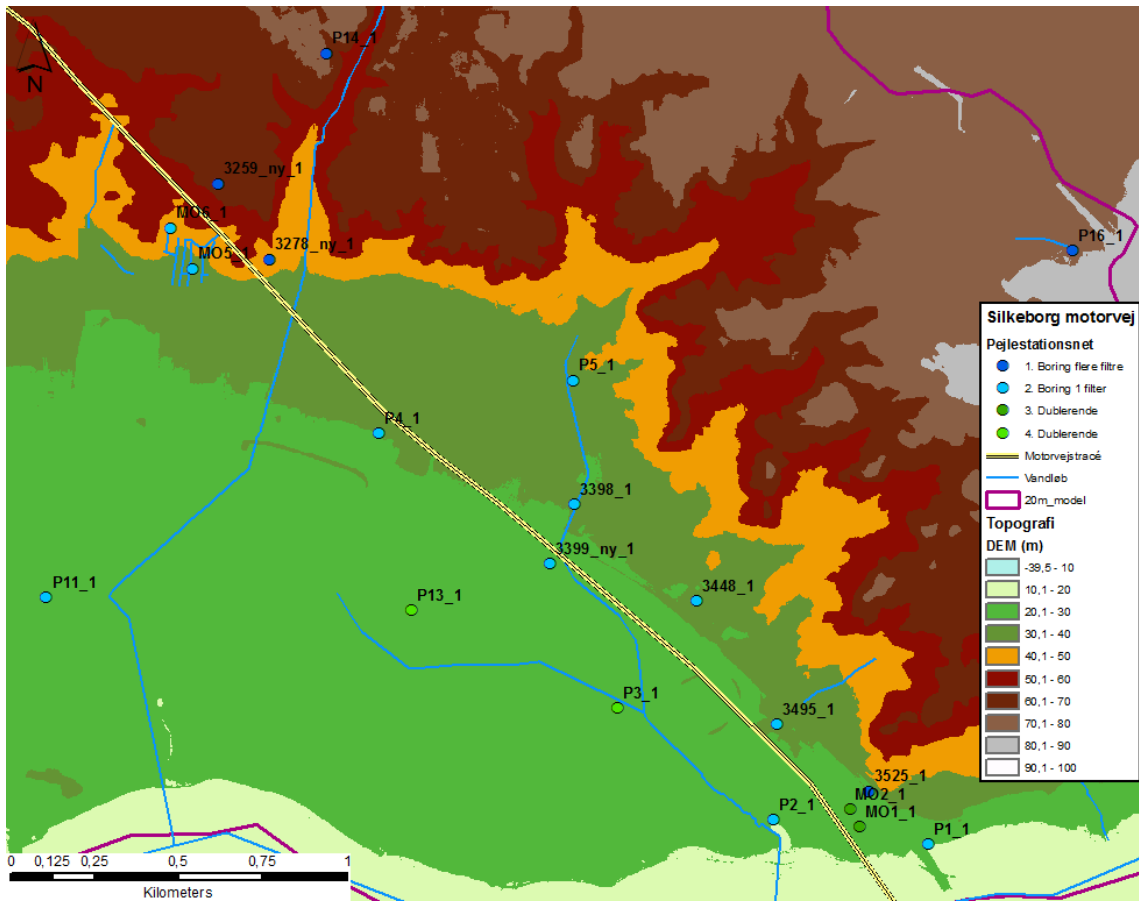
**Tabel 5-1 Forslag til boringer i et fremtidigt pejlestations-net. Gul/orange farve viser boringer med mere end et filter. Grøn/lilla farve viser dublerende boringer. Blå farve viser filtre som i øjeblikket kun håndpejles**

#	Bor.nr.	Filter nr.	Filter-top m DVR90	Filter-bund m DVR90	Monitering	Lithologi	Formål nr.	Antal obs	Gens. Vsp kote
1	P16_2	2	69,80	55,80	Trådløs	DS	1	33072	67,25
	P16_1	1	39,80	33,80	Trådløs	GS	1	34548	43,15
2	P14_2	2	60,10	45,10	Trådløs	DS	1	31112	52,00
	P14_1	1	35,10	22,10	Trådløs	GS	1	31001	43,65
3	3525_3	3	27,30	26,60	Håndpejl.	DS	5	12	28,10
	3525_2	2	18,30	17,60	Trådløs	GS	5	32455	27,40
	3525_1	1	6,60	4,60	Trådløs	GI/GL	5	32456	28,05
4	3278_ny_3	3	43,20	42,50	Trådløs	DS-øvre	2	4465	43,15
	3278_ny_2	2	40,00	38,00	Håndpejl.	GS/GI	2	9	38,70
	3278_ny_1	1	33,00	31,00	Trådløs	GS-nedre	2	10565	34,90
5	3259_ny_2	2	41,10	39,10	Trådløs	DS/GS-øvre	2	21662	44,00
	3259_ny_1	1	32,90	30,90	Trådløs	GS-nedre	2	21664	38,65
6	P5_1	1	24,80	22,80	Trådløs	DS	13	39142	26,00
7	P4_1	1	22,00	20,00	Trådløs	DS	14	38860	23,75
8	P2_1	1	18,20	16,20	Trådløs	GS	15	37260	21,50
9	P11_1	1			Trådløs	DS	12	41002	22,95
10	P1_1	1	16,50	14,50	Trådløs	DG/DS/DI	5	30182	19,30
11	MO6_1	1	43,56	38,56	Trådløs	GS	9	14771	42,90
12	MO5_1	1	34,36	29,36	Trådløs	GS	9	13395	35,10
13	3495_1	1	24,60	22,60	Trådløs	DS	4	36782	23,95
14	3448_1	1	23,50	21,50	Trådløs	DS	10	41045	23,90
15	3399_ny_1	1			Trådløs	DS	4	21970	22,80
16	3398_1	1	23,70	21,70	Trådløs	DS	4	39567	23,75
17	MO2_1	1	24,60	21,60	Trådløs	T/DS	8	20827	25,05
18	MO1_1	1	22,60	17,60	Trådløs	T/DS	8	20750	23,05
19	P3_1	1	20,40	18,40	Trådløs	DS	6	35255	21,90
20	P13_1	1	21,10	19,10	Trådløs	DS	6	37828	22,50





Figur 5-1 Placering af de forslåede boringer i et fremtidigt pejestations-net. Blå signatur viser boringer som vil være velegnede til et fremtidigt stationsnet, grøn signatur viser dublerende boringer



Figur 5-2 De foreslåede boringernes placering ift. områdets højdeforhold

## 6. Forslag til fremtidig procedure for fejlfinding og fejlretning

Baseret på erfaringer primært fra USGS (2003) foreslås en række kriterier for automatisk fejlfinding i indsamlede grundvandsdata til brug for realtids modelsimuleringer af grundvandsstand og vandløbsafstrømninger (Tabel 6-1).

**Tabel 6-1 Forslag til kriterier for automatisk fejlfinding i indsamlede grundvandsdata. Baseret på USGS 2003, tilføjet statistiske metoder for pejleserier.**

Tærskeltype	Tærskelbetegnelse	Flag	Kritisk	Beskrivelse
Størrelse	Meget høj værdi	H	Kritisk	Usandsynlig høj værdi, fx overskridelse af seriens middelværdi + 5 * standardafvigelsen
	Meget lav værdi	L	Kritisk	Usandsynlig lav værdi kommer fx under seriens middelværdi - 5 * standardafvigelsen
	Høj værdi	h	Ikke-kritisk	Værdi overskrider fx seriens middelværdi + 3 * standardafvigelsen
	Lav værdi	l	Ikke-kritisk	Værdi kommer fx under seriens middelværdi - 3 * standardafvigelsen
Ændring	Meget hurtig stigning	S	Kritisk	Stigning pr. tidsinterval mellem seneste og sidst kendte troværdige værdi overskrider fx seriens middelværdi + 3 * standardafvigelsen
	Meget hurtigt fald	F	Kritisk	Sænkning pr. tidsinterval mellem seneste og sidst kendte troværdige værdi kommer fx under seriens middelværdi - 3 * standardafvigelsen
	Langvarig stigning <sup>1)</sup>	s	Ikke-kritisk	Lineær regression over en periode hvor stigningen overskrider fx 3 * forventet årstidsvariation.
	Langvarigt fald <sup>1)</sup>	f	Ikke-kritisk	Lineær regression over en periode hvor sænkningen overskrider fx 3 * forventet årstidsvariation
	Ingen ændring <sup>1)</sup>	K	Kritisk	Usandsynligt lille ændring over en længere periode (konstant ± måleinstrument præcision)

<sup>1)</sup> GEUS tilføjelse til USGS standard

Det foreslåede system til fejlfinding opererer med 3 tærskeltyper: 1) den absolutte størrelse af måling, 2) ændringen i målt værdi mellem et måletidspunkt og det foregående måletidspunkt, og 3) ændringen målt over en periode, for eksempel 1 måned (Tabel 6-1).

Der opereres med 2 niveauer for fejl: 1) kritiske fejl, og 2) ikke kritiske fejl. Denne klassificering af pejledata sammen med de 3 tærskeltyper kan benyttes til vægtning af den værdi de enkelte måleværdier tillægges ved brug fx i grundvandsmodelsimuleringerne.

USGS har ikke indbyggede rutiner til automatisk retning af data og anvender tilsyneladende ikke software til automatisk retning af data. Der er ikke fundet eksempler på software til automatisk dataopretning af hydrologiske data. Derimod har software som AQUARIUS veludviklede faciliteter til manuelt at korrigere data, herunder samtidig visualisering af rådata, felldata (håndpejlinger) og korrigerede data.

Med moderne databaser kan der udvikles rutiner til automatisk klassificering af nye pejledata i minimum 3 kategorier:

- Troværdige: Alle pejlinger som ikke er omtalt i Tabel 6-1
- Utroværdige: Pejlinger i kategorien Kritisk
- Tvivlsomme: Pejlinger i kategorien Ikke-kritisk

Klassificering af monitoringsdata kan benyttes til en foreløbig vægtning af den værdi, de enkelte måledata tillægges ved generering af realtids prognoser for grundvandsstande og vandløbsafstrømninger. Det vil være nødvendigt med mellemrum manuelt at omklassificere tvivlsomme pejledata, og gøre dem enten utroværdige eller troværdige (sidstnævnte evt. med korrigeret niveau, som for eksempel den fremhævede periode i figur B2-0-1). Dette kan ske med eksisterende software, men kan kræve håndpejlinger for at afgøre tvivlstilfælde. For pejlinger i kategorierne Langvarig stigning eller Langvarigt fald er det oplagt at sammenligne med nærtliggende monitoringsboringer for at afgøre, om pejlinger er troværdige.

Det kan være nødvendigt at gentage kørsel af model / simuleringsværktøj for grundvandsstande og vandløbsafstrømning for en periode, hvor pejledata status er korrigeret.

Med samme type instrument anvendt til at monitorere én variabel (i dette tilfælde grundvandsstand) kunne man forvente en ensartet målesikkerhed. Men Bilag 1 Statistik for pejletidsserier viser en stor variation i standardafvigelsen mellem pejletidsserier. Dette kan forklares ved, serierne er rå data, hvor blot *Usandsynligt høje værdier* ( $> 100$  m) er fjernet, og samtidig viser serierne situationen under et byggeri som har påvirket grundvandsniveauet. Det forventes, at pejletidsserierne efter byggeriets færdiggørelse vil blive væsentligt mere ensartede.

## 7. Konklusioner og anbefalinger

Det eksisterende pejlestationsnet med de mange boringer og filtre i flere dybder udgør et godt grundlag for den fremtidige monitoring af grundvandsforhold langs motorvejstracéen ved Silkeborg. Vi mener ikke, der er behov for at etablere nye boringer til den fremtidige monitoring. De tidsserier, der findes for perioden før anlægsarbejdets start og under anlægsarbejdet, vil være værdifulde for vurderinger af, hvorvidt grundvandforhold ændrer sig som følge af motorvejsanlægget.

Vi anbefaler, at der i et fremtidigt pejlestationsnet for motorvejstracéen ved Silkeborg indgår i alt 18 boringer. 3 af disse boringer indeholder 2 filtre og 2 boringer indeholder 3 filtre, det vil sige at det fremtidige pejlestationsnet vil omfatte i alt 25 grundvandsfiltre.

Vi anbefaler at databehandlingen fra pejlestationsnettet sker i to trin. Første trin vil være en automatisk kvalitetssikring, der afsluttes med en kategorisering af pejledata som værende troværdige, tvivlsomme eller utroværdige. Det vil kræve softwareudvikling og –tilpasning. Det andet trin vil bestå af en manuel kvalitetssikring med fokus på de tvivlsomme og utroværdige data som evt. om-klassificeres, justeres eller kasseres. En sådan kvalitetssikring vil være en forudsætning for at kunne benytte monitoringsdata til at vurdere, hvorvidt tilsyneladende ændringer i grundvandsforhold er signifikante, og i hvilket omfang de kan henføres til klimavariationer/ændringer, motorvejsanlægget eller andre eksterne påvirkninger.

En automatisk kvalitetssikring vil endvidere være en forudsætning for en eventuel anvendelse af pejledata i en real-tid modelsimulering med prognoser for grundvandsstande og vandløbsafstrømninger.

## 8. Referencer

- COWI 2014. Grundvandsmonitoring Funder Hårup. Statusrapport december 2014. Vejdirektoratet.
- Fürst, J., A. Bichler, and F. Konecny 2015. Regional Frequency Analysis of Extreme Groundwater Levels. *Groundwater*. Vol. 53, No. 3. May-June 2015, 414–423.
- GEUS 2005. Lokaliseringsvejledning 2005. GEUS, Borearkivet, januar 2005.
- GEUS 2006. Vejledning i indberetning af pejledate. GEUS, november 2016.
- Henriksen, H.J., Andersen, G. og Rasmussen, P 1996. Ekstrem lille grundvandsdannelse 1995-96. *Vand & Jord*. 3. årgang 3, Nr. 4, august 1996, 152-156.
- Hirsch, R.M. 2000. Quality Assurance Measures for Serving Real-time Water Data on the World Wide Web. Water Resources Division Policy Memorandum No. 99.34. USGS February 28, 2000.
- Jakobsen, P.R., J.B. Kidmose, and E.S. Rasmussen 2014. Geologien i mortovejsstrækningen ved Silkeborg. Profilbeskrivelser og opdatering af geologisk model fase 2. GEUS Rapport 2014/77.
- NGWNM 2013. A National framework for Ground-Water Monitoring in the United States. Prepared by The Subcommittee on Ground Water of The Advisory Committee of Water Information. Approved by The Advisory Committee of Water Information. First Release June 2009. Revised July 2013.
- Post, V.E. A. and J.R. von Asmuth 2013. Review: Hydraulic head measurements—new technologies, classic pitfalls. *Hydrogeology Journal* 21: 737–750. DOI 10.1007/s10040-013-0969-0.
- Prinos, S.T., A.C. Lietz, and R.B. Irvin 2002. Design of a Real-Time Ground-Water Level Monitoring Network and Portrayal of Hydrologic Data in Southern Florida. U. S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 01-4275. Prepared in cooperation with the South Florida Water Management District.
- Thorling, L. and C. Langtofte 2012. Pejlinger af grundvandsstanden i feltet. Teknisk anvisning, TA. nr.: G03, Version: 1, Oprettet: 15-3-2012. GEUS.  
<http://www.geus.dk/publications/grundvandsovervaagning/>
- Troldborg, L., J.C. Refsgaard, J.B. Kidmose, and M.T. Randall 2013. Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg. Statusrapport fase 1.3. GEUS Rapport 2103/43.
- USGS 2003. User's manual for the national water information system of the U.S. Geological Survey. Automated Data Processing System (ADAPS). U.S. Geological Survey Open-File Report 03-123. Version 4.3. Reston, Virginia.
- Zhou, Y., D. Dong, J. Liu and W. Li 2013. Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain, China. *Geoscience Frontiers* 4: 127 – 138.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.008>.

### Software

- MIKE CUSTOMISED by DHI. <http://www.mikecustomisedbydhi.com/>
- AQUARIUS by Aquatic Informatics Inc. <http://aquaticinformatics.com/>
- WISKI and Hydstra by Kisters. <http://www.kisters.eu/> or <http://kisters.com.au/>

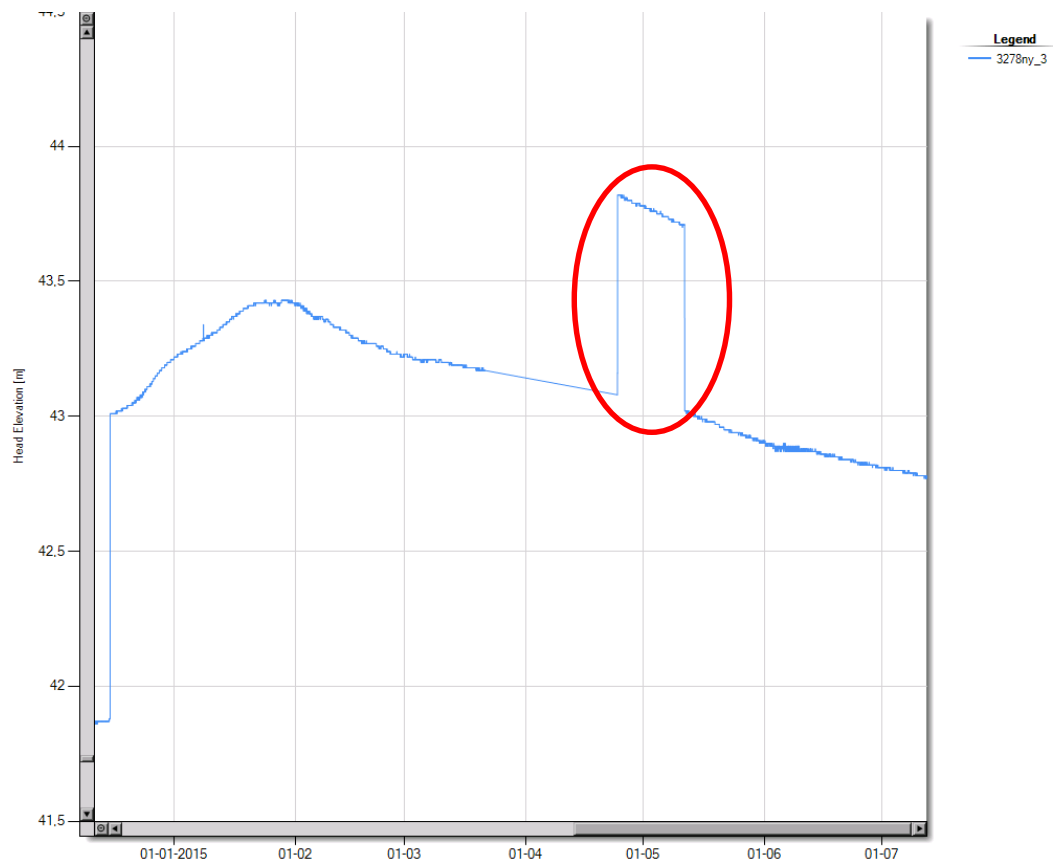
# Bilag 1 Statistik for pejletidsserier

Tabel B1-0-1 Beskrivende statistik for tidsserier fra aktive monitoringsboringer

Bor. nr.	Antal obs.	Min.vsp (m)	Max.vsp (m)	Genm. (m)	Std.afv (m)	Ampl. (m)	Tid (år)	Obs (/dag)
P2_1	37260	20,05	22,48	21,50	0,45	2,43	4,9	21,0
3457_1	41050	21,09	23,81	23,15	0,70	2,72	4,9	23,2
P1_1	30182	16,68	21,05	19,30	0,25	4,37	4,9	17,0
P5_1	39142	25,07	27,99	26,00	0,20	2,92	4,7	22,9
3398_1	39567	20,37	24,36	23,75	0,35	3,99	4,7	23,1
P13_1	37828	22,17	22,83	22,50	0,15	0,66	4,7	22,1
3448_1	41045	22,88	30,43	23,90	0,30	7,55	4,7	24,0
P3_1	35255	20,43	22,30	21,90	0,30	1,87	4,7	20,6
P11_1	41002	22,62	23,86	22,95	0,20	1,24	4,7	24,0
P4_1	38860	19,68	24,50	23,75	0,20	4,82	4,6	22,9
3495_1	36782	22,45	29,88	23,95	0,80	7,43	4,6	21,7
P16_1	34548	42,79	43,61	43,15	0,10	0,82	4,2	22,3
P16_2	33072	62,75	68,50	67,25	0,65	5,75	4,2	21,4
P14_1	31001	37,97	43,91	43,65	0,10	5,94	4,2	20,0
P14_2	31112	49,69	65,45	52,00	5,05	15,76	4,2	20,1
3525_1	32456	27,30	28,33	28,05	0,20	1,03	3,9	22,8
3525_2	32455	26,12	27,71	27,40	0,20	1,59	3,9	22,8
Mose_1	25557	22,06	22,39	22,30	0,05	0,33	2,9	24,0
3399_ny_1	21970	21,02	23,36	22,80	0,40	2,34	2,9	20,9
MO2_1	20827	23,37	25,38	25,05	0,25	2,01	2,4	24,0
MO1_1	20750	22,27	23,30	23,05	0,15	1,03	2,4	24,0
MO4_1	16316	23,67	24,13	23,90	0,15	0,46	2,1	21,4
MO3_1	10273	18,24	25,94	23,75	0,80	7,70	2,1	13,5
MO5_1	13395	34,19	35,66	35,10	0,25	1,47	1,8	20,8
MO6_1	14771	40,34	44,13	42,90	0,75	3,79	1,8	22,9
Vand01_1	11774	58,42	62,32	59,25	0,95	3,90	1,6	20,4
Vand02_1	13821	62,32	62,59	62,55	0,05	0,27	1,6	24,0
Vand04_1	13809	70,70	71,19	71,00	0,15	0,49	1,6	24,0
Vand05_1	13832	67,34	67,95	67,75	0,15	0,61	1,6	24,0
Vand03_1	156892	66,52	68,74	68,25	0,25	2,22	1,6	272,5
3259_ny_1	21664	38,06	38,89	38,65	0,10	0,83	1,4	43,7
3259_ny_2	21662	43,79	44,54	44,00	0,15	0,75	1,4	43,7
3278_ny_3	4465	41,22	43,82	43,15	0,40	2,60	1,4	9,0
3278_ny_1	10565	34,43	35,36	34,90	0,20	0,93	1,4	21,4

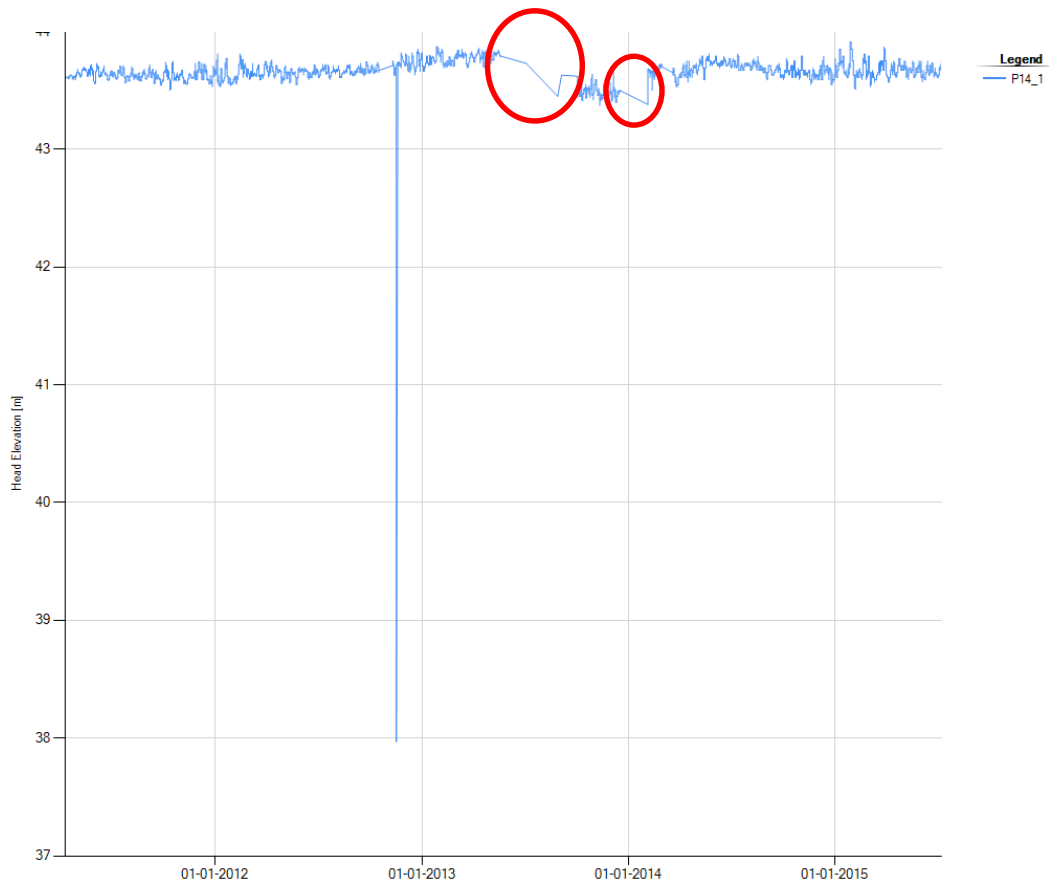
## Bilag 2 Eksempler på typiske fejl

Eksempler på typiske fejl i pejleserier fra eksisterende monitoringsboringer. Der er vist en tidsserie for hver fejltype.



Figur B2-0-1 Forskydning af tidsserie

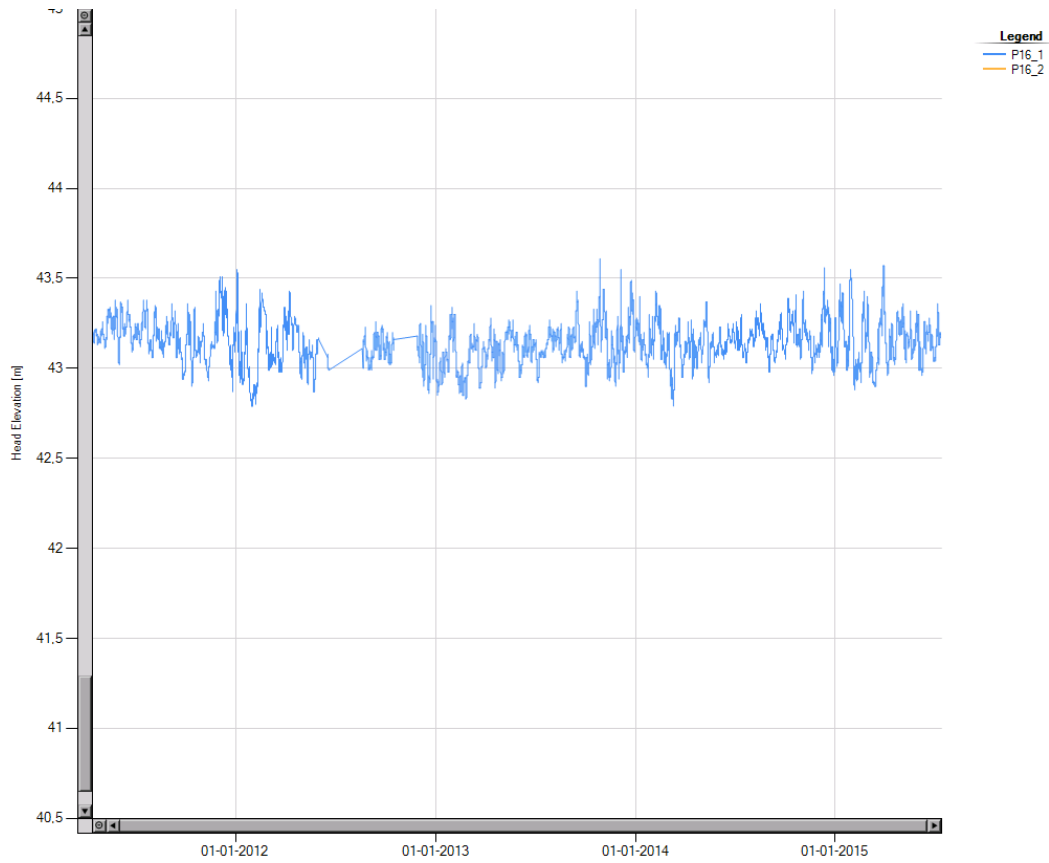




Figur B2-0-2 Datautfald



Figur B2-0-3 Fejlbehæftede data



Figur B2-0-4 Unaturlig variation i grundvandsstand