

# Energibesparelse på kildepladsniveau



**DANVA**  
Dansk Vand- og  
Spildevandsforening



DANVA  
FORSKNINGS- OG UDREDNINGSPROJEKT NR. 16, 2009



# **Energibesparelse på kildepladsniveau**

Oktober 2009

## INDHOLDSFORTEGNELSE

1	INDLEDNING OG BAGGRUND .....	1-1
2	MODELKOMPONENTER .....	2-1
2.1	Integreret ledningsnet- og grundvandsmodel .....	2-1
2.1.1	Grundvandsmodel.....	2-1
2.1.2	Ledningsnetsmodel .....	2-3
2.1.3	Boringsmodel .....	2-3
2.1.4	Integreret ledningsnet- og grundvandsmodel .....	2-3
3	MÅLEKAMPAGNE FOR BIRKERØD VANDFORSYNING .....	3-1
3.1	Eksisterende forhold .....	3-1
3.2	Resultater af målekampagnen.....	3-1
3.2.1	Prøvepumpninger.....	3-1
3.2.2	Bestemmelse af skinfaktor og virkningsgrad .....	3-4
3.2.3	Bestemmelse af pumpekaraktistikker.....	3-5
3.2.4	Måling af trykvariationer i råvandsnettet .....	3-7
4	MODELUDVIKLING FOR BIRKERØD VANDFORSYNING .....	4-1
4.1	Grundvandsmodel.....	4-1
4.1.1	Oplandsmodel.....	4-1
4.1.2	Grundvandsmodel for kildepladsen .....	4-1
4.2	Ledningsnetsmodel .....	4-2
4.2.1	Kalibrering af ledningsnetsmodel .....	4-3
5	KILDEPLADSMODEL .....	5-1
5.1	Udvikling .....	5-1
5.2	Kalibrering og validering.....	5-2
6	FORSLAG TIL UDSKIFTNING AF PUMPER BASERET ALENE PÅ MÅLEKAMPAGNEN .....	6-1
7	OPTIMERING AF BIRKERØD VANDFORSYNING KILDEPLADS BASERET PÅ ANVENDELSE AF KILDEPLADSMODELLEN .....	7-1
7.1	Basisscenarier .....	7-1
7.2	Andre scenarier.....	7-4
7.3	Økonomiske betragtninger .....	7-5
8	OPSKALERING TIL LANDSPLAN .....	8-1
9	PERSPEKTIVERING .....	9-1
10	REFERENCER .....	10-1

## **BILAG**

- Bilag 1 Pumpebestykning på kildepladsen, Birkerød Vandforsyning
- Bilag 2 Resultater af målekampagne, Birkerød Vandforsyning
- Bilag 3 MODFLOW and More, 2008 paper
- Bilag 4 Oplandsmodel for Usserød Å
- Bilag 5 Opskalering til landsplan

ISBN: 978-87-92651-00-6

Titel: Energibesparelse på kildepladsniveau, DANVA F&U rapport nr. 16

Udgiver: DANVA  
Vandhuset  
Godthåbsvej 83  
8660 Skanderborg

Gennemført af:

- Anders Refsgaard, Forretningsudvikler DHI Vand • Miljø • Sundhed
- Svend Sidenius, Chefkonsulent, Alectia
- Peter Baggerman, Business Development Manager for Water Utility, Grundfos
- Henrik Madsen, Innovationschef, DHI
- Anne Katrine Falk, Systemudvikler, DHI
- Henning Saabøll, Direktør Birkerød Vandforsyning

Finansiering:

Vejledningen er finansieret af:  
DANVAs F&U konto

## 1 **INDLEDNING OG BAGGRUND**

Energiforbruget på en vandforsyning er – udover lønudgifter – suverænt den største post i driftsregnskabet. DANVA's benchmarking viser, at der er meget stor spredning på de vandforsyninger, som deltager i undersøgelsen, hvorfor det konkluderes, at der er et stort potentiale for energibesparelse. Energiforbrugene ligger på fra 0.1 til 1 kWh/m<sup>3</sup> for vandforsyningen som helhed, med et gennemsnitligt forbrug omkring 0.5 kWh/m<sup>3</sup>. En betydelig del af energiforbruget relaterer sig til pumperne i indvindingsboringerne, og en dynamisk styring af disse er afgørende for effektiviteten, og dermed strømforbruget på kildepladsen. Traditionelt arbejder mange vandforsyninger med statiske krydsfelter for pumpeindkoblinger, som bygger på lang tids erfaring, ”motionering” af alle pumper, fornemmelser for vandkvalitet mv. Tilsvarende har mange vandforsyninger statiske intervaller for reovering af pumper, boringer mv.

En overvågning af tryk og flow i boringer og råvandsnet vil bidrage til en bedre forståelse af forholdene, men uden dynamisk styring og hermed integreret modellering af forholdene, hvor elementerne grundvand, pumpeystem og råvandsledninger indgår, opnår man ikke den fulde forståelse for forholdet mellem oppumpning, pumpekaraktistik, trykforhold i råvandssystem, afsenkning i grundvandssystemet, vandkvalitet af blandingsvand mv.

DANVA har selv vurderet, at der kan spares op til 25% af elforbruget for vandsektoren som helhed, og det vurderes, at strømforbruget alene på kildepladsniveau ved energioptimering af driften – i gennemsnit – kan nedbringes med 10-30%.

Med en kombineret overvågning og modellering af tilstanden på kildepladsen vil der ligeledes kunne effektiviseres på udskiftningsfrekvensen af pumper og rørsystemer, tilpasning til de aktuelle (dynamiske) forhold og driften af ilttings- og filteranlæg på vandværket. Der kan også i tilfælde af forureningstrusler skabes en mere tryk og optimal indvindingsstruktur ligesom påvirkninger af naturen i form af udtørring af vandløb, vådområder, mosehuller mv. kan minimeres. Disse forhold er ligeledes til gavn for forbrugerne i form af øget forsyningsikkerhed og for samfundet i form af naturbevarelse.

DANVA har bevilliget støtte til et projekt (Energioptimering på kildepladser) for at undersøge potentialet for energioptimering i dansk vandforsyning. I projektet vil den igangværende forskning og herunder udviklede teknologier gøres operationelle for en typisk mellemstor dansk vandforsyning med efterfølgende vurdering af potentialet på landsplan og udbredelse af resultaterne af undersøgelserne til en bredere kreds.

Overordnet indeholder projektet følgende komponenter:

- 1) Udvikling af modelkomponenter
- 2) Målekampagner og udvikling af modeller for Birkerød Vandforsyning
- 3) Optimering af indvindingen på Birkerød Vandforsynings kildeplads
- 4) Opskalering af potentialet for energibesparelse på nationalt niveau.

Nærværende rapport udgør sammen med de tilhørende bilag den endelige afrapportering af projektet.

Projektet er gennemført af:

Anders Refsgaard, Forretningsudvikler DHI Vand • Miljø • Sundhed

Svend Sidenius, Chefkonsulent, Alectia

Peter Baggerman, Business Development Manager for Water Utility, Grundfos

Henrik Madsen, Innovationschef, DHI

Anne Katrine Falk, Systemudvikler, DHI

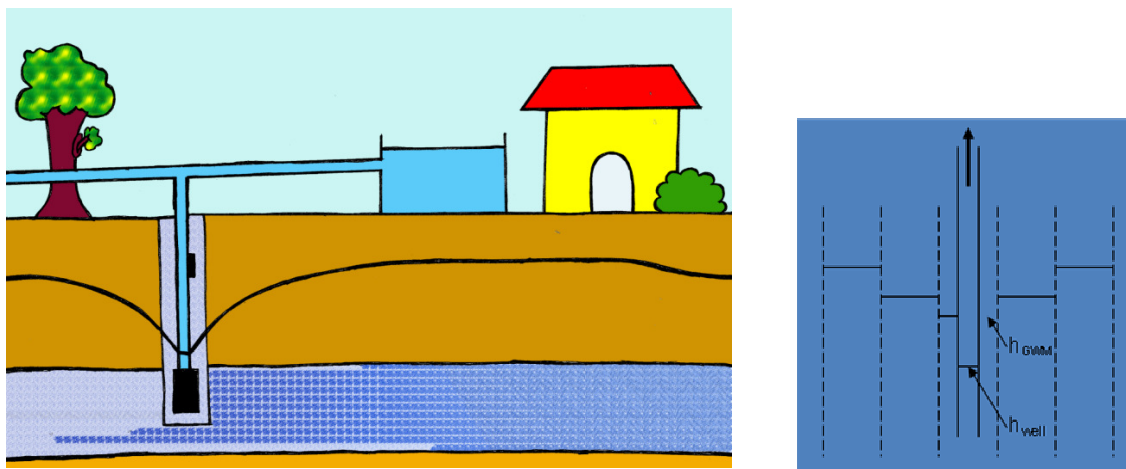
Henning Saabøll, Direktør Birkerød Vandforsyning

Projektet har anvendt teknologi udviklet i forskningsprojektet ” Integration of modelling, monitoring and optimisation technologies for real-time management of groundwater resources” støttet af Det Strategiske Forskningsråd, Programkomiteen for Bæredygtig Energi og Miljø (<http://wellfield.dhigroup.com/>).

## 2 MODELKOMPONENTER

### 2.1 Integreret ledningsnet- og grundvandsmodel

Projektet har bidraget til aftestning af en kode til beskrivelse af det integrerede system bestående af grundvandssystem, boring/pumpe og ledningsnet. Systemet er integreret, fordi pumpeydelsen af en given pumpe i en given indvindingsboring er afhængig af modtrykket i ledningsnettet og afsænkningen i selve boringen, som igen er afhængig af pumpeydelsen og grundvandssystemets hydrauliske egenskaber samt trykændringerne ved overgangen fra grundvandssystemet til boringen.



Figur 2.1 Principskitse, som viser, at afsænkningen i en grundvandsboring er anderledes end afsænkningen i grundvandsmagasinet

Med andre ord er grundvandsspejlet i boringen en randbetingelse i ledningsnetmodellen og pumperaten en randbetingelse i grundvandsmodellen som antydnet i Figur 2.1.

De grundlæggende modelkoder er grundvandsmodellen i MIKE SHE (Graham and Butts, 2006), ledningsnetsmodellen EPANET (Rossman, 2000) og en modificeret udgave af Multi Node Well boringsmodellen (Halford and Hanson, 2002) udviklet som en add-on til MODFLOW (Harbaugh, 2005).

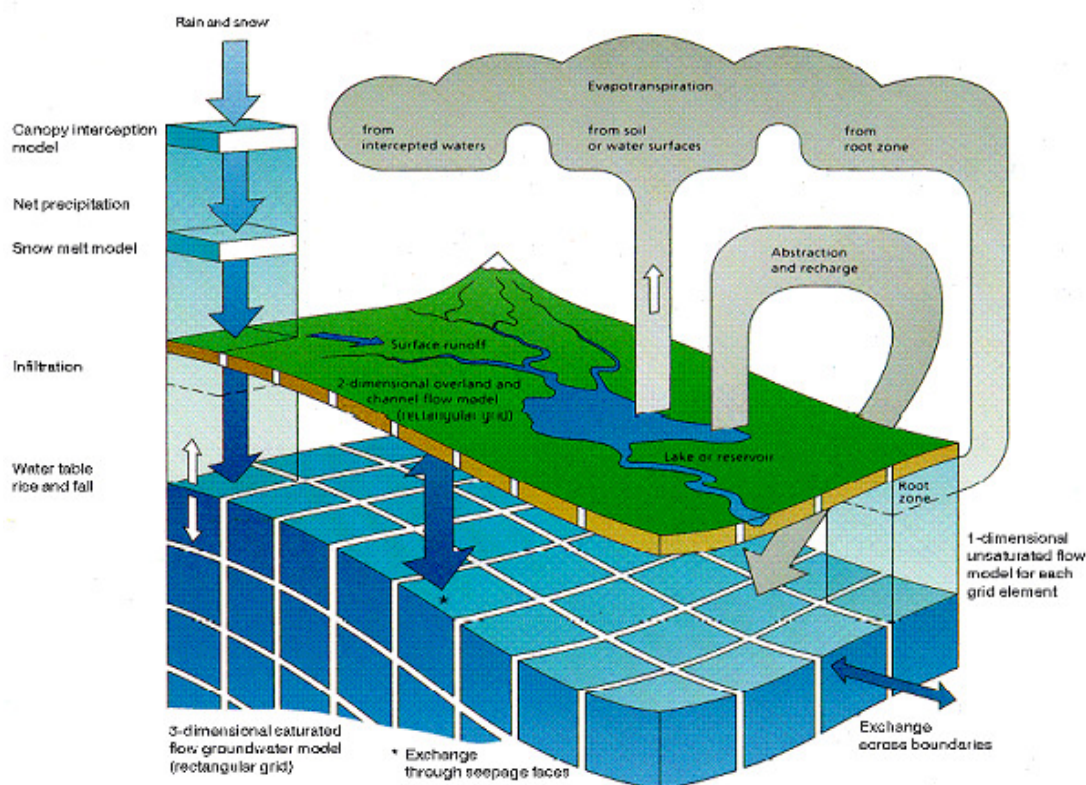
#### 2.1.1 Grundvandsmodel

MIKE SHE er karakteriseret som en fysisk baseret, distribueret og integreret hydrologisk grundvands- og overfladevandsmodel. Modelkoden er opbygget i komponenter, som beskriver de enkelte dele i det hydrologiske kredsløb:

1. aktuel fordamning ud fra jord- og plantefysiske data og klimadata;
2. infiltrationen gennem jordens umættede zone ud fra beregnet nettonedbør og jordfysiske data;
3. grundvands- og drænastrømning ud fra beregnet infiltration, udveksling med vandløb og anden overfladevand samt hydrogeologiske data og information om grundvandsindvindinger (vandforsyning og markvanding) i området;
4. strømning på jordoverfladen ud fra topografiske forhold (og beregnet nettonedbør og grundvandsstand).

Modelkoden er som sådan i stand til at beskrive de ønskede hydrologiske og hydrogeologiske forhold gennem integreret anvendelse af komponenter for nedbør, fordampning, infiltration, strømning i umættet zone, grundvandsstrømning og vandløbsstrømning med anvendelse af alle tilgængelige data og indsamlet viden fra området.

Nedenstående Figur 2.2 viser, hvordan de vigtigste processer i MIKE SHE er integreret sammen til at udgøre en hydrologisk modelkode.



Figur 2.2 MIKE SHE er velegnet som modelkode til beskrivelse af de styrende hydrologiske processer i systemer, hvor integrationen mellem grundvand og vandløb samt andre overfaldevande er betydende

Ud over at være integreret med hinanden er modelkoderne integreret med MIKE Zero, som er det generelle brugerinterface til alle DHI's modelsystemer. Dette giver adgang til en lang række databehandlings- og præsentationsværktøjer samt integration med GIS.

I sammenhæng med anvendelse til kildepladssimulering er det i mange tilfælde tilstrækkeligt at arbejde med grundvandsmodellen i MIKE SHE koden og angive grundvandsdannelsen som input (frem for at lade modellen beregne denne ud fra nedbør, fordampning, drænafstrømning mv.). Grundvandsdannelsen kan eventuelt være beregnet i en oplandsmodel eller regional model og som sådan være valideret mod andre uafhængige variable. Herved kan beregningerne gennemføres i et mere detaljeret beregningsnet, hvorved grundvandsgradienter bedre kan beskrives.

### 2.1.2 **Ledningsnetmodel**

Ledningsnetmodellen EPANET er en open-source hydraulisk model til beregning af tryk og vandføring i et (komplekst) ledningsnet med givne randbetingelser i form af pumper, pumpekarakteristikker, grundvandsmagasiner, udløbshøjder mv. Modellen er stationær, hvilket dog er en god tilnærmelse til virkeligheden i råvandssystemer.

### 2.1.3 **Boringsmodel**

Et fundamentalt problem med anvendelse af grundvandsmodeller i forbindelse med kildepladsundersøgelser er skalaen i grundvandsmodellens beregningselementer sammenlignet med boringskalaen. En grundvandsindvinding simuleres normalt som et middeludtag i et beregningselement og selv om vandbalancen dermed er korrekt, bliver selve beregningen af afsænkningen i grundvandsmagasinet tæt på boringen, hvor der ofte vil være store gradienter, ikke korrekt for slet ikke at tale om afsænkningen i selve pumpeboringen. Et andet problem af lignende karakter er, at en filtersætningen i en boring kan fordeles over flere beregningslag i grundvandsmodellen, og den dynamiske indvindingsfordeling i beregningerne er ikke trivielt.

Multi node well modellen (Halford and Hanson, 2002) er udviklet for at tage højde for ovennævnte problemstillinger. Med dette modul kan der tages højde for filtersætning over flere beregningslag, ligesom formations og filtertab kan medtages i beregningen. Herved kan afsænkningen i selve indvindingsboringen beregnes. Hvis der er tale om en indvindingsboring, som er filtersat i ét lag vil beregningen af afsænkningen i selve boringen ske efter følgende formel:

$$h_{well} - h = AQ + BQ + CQ^p$$

Hvor  $h_{well}$  er vandstanden i boringen

$h$  er grundvandstrykket i beregningscellen

$Q$  er indvindingsmængden

$A$  er lineær formationstabskoefficient

$B$  er lineær boringstabskoefficient

$C$  er ikke-lineær boringstabskoefficient

$p$  er eksponenten i det ikke-lineære boringstab.

Hvis filtersætningen strækker sig over flere beregningslag, bliver beregningerne tilsvarende udvidet. Faktorerne  $A$  og  $B$  relaterer sig til forskellige størrelser, som er bestemt af grundvandsmodellen (transmissivitet og størrelsen på beregningsnettet), men relaterer sig endvidere til skinfaktoren og boringens (indvendige) radius. Endvidere skal kildepladsmodellen kende boringens filterinterval (eller åbne interval).

### 2.1.4 **Integreret ledningsnet- og grundvandsmodel**

Som tidligere omtalt er der udviklet en integreret og dynamisk hydrologisk og hydraulisk kildepladsmodel, som kombinerer de ovenfor beskrevne modeller, Madsen et al., 2007 og Madsen et al., 2008 (vedlagt som bilag 3). Modelsystemet er designet til

detaljeret simulering af strømningerne på en kildeplads fra grundvandsmagasinet via borerne til f.eks. iltningstrappen på vandværket.

Systemet er integreret, fordi pumpeydelsen af en pumpe i en indvindingsboring er afhængig af modtrykket i ledningsnettet og afsænkningen i selve boringen, som igen er afhængig af pumpeydelsen og grundvandssystemets hydrauliske egenskaber samt trykændringerne ved overgangen fra grundvandssystemet til boringen. I den integrerede model foregår der en iteration mellem grundvandsmodellen og ledningsnettsmodellen for at beregne det korrekte tryk og flow i de to medier.

## **3 MÅLEKAMPAGNE FOR BIRKERØD VANDFORSYNING**

### **3.1 Eksisterende forhold**

Birkerød Vandforsyning er valgt som case, da den repræsenterer en typisk, mellemstor forsyning. Der er 9 forsyningsboringer med varierende bestykning tilsluttet råvandsnettet over en strækning på 2-3 km. Der indvindes både fra et nedre, primært kalkmagasin og fra et øvre sekundært kvartært magasin. Boreddybden varierer fra 56 til 91 m. Den specifikke ydelse på boringerne varierer også meget, ligesom vandkvaliteten ligeledes varierer noget mht. til indhold af jern, mangan og enkelte miljøfremmede stoffer. Bilag 1 indeholder en oversigt over bestykningen på kildepladsen samt linjeføringen for råvandsnettet.

Der er flere forureningstrusler fra tidligere industriområder, som formentlig med tiden skal håndteres – også i forhold til pumpestrategi. Vandforsyningen kører med et fast ugentligt styreskema for indvindingen, som udover ugenummer er styret af (den dynamiske) vandstand i vandtårnet. Der er altså som sådan ikke nogen on-line styring af pumperne baseret på tryk, vandkvalitet og andet, men der foretages en monitoring af timeforbruget på de enkelte boringer, den samlede indvindingsmængde, trykket udvalgte steder i systemet og naturligvis vandkvaliteten af både råvand og drikkevand. Som sådan repræsenterer vandforsyningen en ganske traditionel forsyning.

Tæt på de nordligste boringer på kildepladsen (mindre end 500 m) har Nordvand forsyning en stor kildeplads. Det har ikke under prøvepumpningerne været muligt at sikre ingen eller konstant drift på denne kildeplads, og der har muligvis været visse forstyrrelser herfra undervejs.

Gennem målekampagnen, som har indeholdt kontinuerte målinger af tryk og flow under forskellige belastningssituationer i udvalgte punkter i råvandsnettet og prøvepumpninger af alle boringer med samtidig måling af grundvandsstand i andre boringer, vil der opnås en forståelse af den aktuelle situation i råvandssystemet. Med anvendelse af forskellige fortolkningsmetoder bestemmes råvandssystemets karakteristika i form af de aktuelle pumpe karakteristikker, ruheder i rør, indstrømningstab i filterrør, tryktab i forskellige dele af råvandsnettet. Der er ligeledes foretaget en fortolkning af prøvepumpningsdata med henblik på at bestemme de hydrauliske egenskaber af grundvandsmagasinet i nærområdet omkring kildepladsen.

## **3.2 Resultater af målekampagnen**

### **3.2.1 Prøvepumpninger**

Gennem en periode på knap en måned i efteråret 2008 blev alle boringer på Vandforsyningens kildeplads prøvepumpet. Prøvepumpningsperioden var typisk 5 timer med pejling i pumpeboringen og naboboringer. Under pumpeforsøget blev der registreret tryk og flow i pumpeboringen med mobilt udstyr. Under alle forsøg blev der enten ikke kørt med andre boringer eller kørt med konstant drift på den fjerneste del af kildepladsen. I alle tilfælde på nær ét har det været muligt at opretholde et konstant flow i pumpeboringen på trods af afsænkningerne.

Pejlingerne under pumpetesten er indtastet i analyseprogrammet Aquifer Test Pro 4.2 og data er analyseret under forskellige antagelser. I alt 4 forskellige metoder har været anvendt i analysearbejdet til bestemmelse af transmissivitet (T) og magasintal (S).

Der er tale om et spændt grundvandsmagasin i opsprækket kalk dækket af et relativt tykt lag af moræneler og i visse områder af et tyndt lag smeltevandsler. Der er indlejret sandlinser af varierende tykkelse og udbredelse i morænen. Dvs. der kan være tale om strømning i dobbeltporøst magasin eventuelt med lækage fra overliggende dæklag.

Samstemmende for nedennævnte analysemetoder er, at de er væsentlig mere ”robuste” i forhold til T end til S. Med andre ord er transmissiviteten bestemt med større sikkerhed end magasintallet.

### **Theis**

Den klassiske strømningsteori omkring en indvindingsboring blev udviklet af Theis for snart 100 år siden. Den beskriver den radiærsymmetriske strømning i et homogent, isotropt grundvandsmagasin uden horisontal begrænsning. Desuden forudsættes det, at filtret dækker hele tykkelsen af grundvandsmagasinet. Herved kan sænkningen i grundvandsmagasinet udtrykkes som en funktion af T, S, og pumpeydelsen. T og S bestemmes typisk ved kurvefitning. Denne metode er typisk anvendt til analyse af sænkningen i observationsboringer.

### **Cooper-Jacob**

Tæt ved pumpeboringen og efter lang tids pumpning kan Theis udtryk for sænkningen i grundvandsmagasinet tilnærmes med en lineær funktion, hvor sænkningen beskrives udelukkende af T og pumpeydelsen. Metoden kaldes ofte retliniemetoden.

### **Hantush with storage**

I en enkelt boring (B1) har det ikke været muligt at anvende Cooper-Jacob tilnærmelsen. I stedet er der anvendt en metode, som kan tage højde for lækage fra overliggende lag. Metoden giver – ud over T og S i det prøvepumpede lag – en beregning af magasintallet i dæklaget. Dette forekommer dog usikkert og vil ikke blive anvendt i det følgende.

### **Double porosity**

Pejlingerne fra mange af pumpeboringerne har ikke kunnet analyseres med ovenstående metoder. Her er der tilsyneladende tale om effekter fra den dobbeltporøse karakter, som hersker i grundvandsmagasinet; i den tidlige fase er det afgivelsen af vand fra de højtransmissive sprækker med lavt magasintal, hvilket i en overgangsfase suppleres med afgivelse af vand fra den lavtransmissive matrice og afsluttende er en kombination af disse. Sprækketransmissiviteten bestemmer under hele forløbet flowet i grundvandsmagasinet.

### **Analyser**

I det følgende er hovedresultaterne af prøvepumpningerne vist og kommenteret. Bilag 2 indeholder samtlige målinger og analyser.

Tabel 3.1 Hovedresultaterne af prøvepumpningerne

Pumpeboring	Boring	Analysemetode	T [ $10^{-3}$ m <sup>2</sup> /s]	S [ $10^{-4}$ ]
B1	B1	Hantush with storage	1.7	0.01
B3	B3	Cooper and Jacob	1.6	70
B3	B3	Double porosity	1.6	1
B3	B4	Theis	1.3	0.7
B4	B4	Cooper and Jacob	1.3	5000
B4	B4	Double porosity	1.3	1520
B4	B3	Theis	1.2	0.6
B4	B5	Theis	1.4	0.4
B5	B5	Cooper and Jacob	2.0	5000
B5	B5	Double porosity	1.8	1
B5	B4	Theis	1.6	4
B5	B6	Theis	1.7	5
B6	B6	Cooper and Jacob	11.3	5000
B6	B6	Double porosity	8.9	50
B6	B5	Theis	10.9	10
B6	B7	Theis	8.4	1
B7	B7	Cooper and Jacob	7.5	0.01
B7	B7	Double porosity	5.5	0.9
B7	B6	Theis	12.3	0.6
B7	B8	Theis	30.9	1.5
B8	B8	Cooper and Jacob	13.7	0
B8	B8	Double porosity	7.3	0.2
B8	B7	Theis	27.8	0.9
B8	B9	Theis	-	-
B9	B9	Cooper and Jacob	30.0	4180
B9	B9	Double porosity	-	-
B9	B8	Theis	43.2	2.3
B9	B10	Theis	40.3	0.2
B10	B10	Cooper and Jacob	53.5	0.09
B10	B10	Double porosity	-	-
B10	B8	Theis	55.8	1.7
B10	B9	Theis	62.3	0.14

Grundvandsmagasinet på kildepladsen er generelt meget højtydende med små afsænkninger på trods af høje pumperater. Specielt er området omkring boring 8, 9 og 10 meget fordelagtigt. Som det fremgår af tabellen kan kildepladsen inddeles i 3 hovedområder:

- 1) et område, som indeholder B1, B3, B4 og B5, hvor transmissiviteten er  $1-2 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s
- 2) et område, som indeholder B6, B7 og til dels B8, hvor transmissiviteten er  $5-15 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s
- 3) et område, som indeholder B9, B10 og til dels B8, hvor transmissiviteten er  $30-60 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s

Magasintallet varierer ganske meget i analyserne, nemlig fra  $1e^{-6}$  til 0.5. Dette er mere et udtryk for usikkerheden på bestemmelsen af S end den reelle variation. I den senere modellering forventes S bestemt ved kalibrering med udgangspunkt i en værdi på  $0.5-1 \cdot 10^{-4}$ .

### 3.2.2 Bestemmelse af skinfaktor og virkningsgrad

I forbindelse med pumpning i et grundvandsmagasin sker der en afsenkning i grundvandsmagasinet, som bl.a. er bestemt af transmissivitet, magasintal og pumpemængde. Disse egenskaber bestemmes typisk ved en prøvepumpning. Afsenkningen i selve boringen er derudover styret af et eventuelt tryktab ved indstrømning til stigrøret. Der kan i visse tilfælde være tale om, at afsenkningen i selve boringen er mindre end den teoretiske afsenkning i grundvandsmagasinet. Dette forekommer i formationer, hvor boringen f.eks. står i et højtransmissivt område, mens selve grundvandsmagasinet generelt har en lavere transmissivitet.

Skinfaktoren bestemmes ud fra prøvepumpningsdata, hvor afsenkningen i en pumpeboring er målt. Theis' løsningen kan – for afsenkninger i formationen tæt ved en pumpeboring – tilnærmes som:

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{135Tt}{r^2 S}$$

Hvor  $s$  – afsenkning i formation

$Q$  – oppumpning [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$T$  – transmissivitet [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$t$  – tiden [minutter]

$S$  – magasintallet [-]

$r$  – afstand fra pumpeboring [m].

For at bestemme afsenkningen i pumpeboringen, som ofte er forskellig fra afsenkningen i formationen, indføres der en såkaldt skinfaktor, som bl.a. er udledt i Nielsen (2007). Skinfaktoren kan udtrykkes ved:

$$\sigma = 1.1513 \left( \frac{s_w T}{0.183Q} - \log \frac{135Tt}{r_w^2 S} \right)$$

Hvor  $\sigma$  – skinfaktoren

$s_w$  – afsenkning i pumpeboring

$r_w$  – boringens radius.

Skinfaktoren kan være både negativ og positiv; en negativ skinfaktor udtrykker, at afsenkningen i pumpeboringen er mindre end den teoretisk forventede afsenkning i formationen i afstanden  $r_w$ . Jo tættere skinfaktoren er på 0, jo bedre afspejler trykniveauet i boringen trykniveauet i formationen. Det skal bemærkes, at den bestemte skinfaktor ikke er identisk med den, som senere anvendes i kildepladsmodellen, men snarere en anden måde at udtrykke virkningsgraden i en boring.

I praksis udvælges et punkt på afsænkingskurven, hvor der er en retlinet afhængighed mellem  $\log(t)$  og  $s_w$  (typisk hvor  $T$  er bestemt).  $S$  bestemmes ud fra afsænkingsforløbet i en observationsboring.

Nedenstående Tabel 3.2 giver en liste over de bestemte skinfaktorer. Mange af disse er negative, hvilket betyder, at borerne har lille afsækning i forhold til den teoretiske afsækning i formationen og dermed en virkningsgrad større end 100%.

Tabel 3.2 Bestemmelsen af skinfaktor for borerne på Birkerød Vandforsynings kildeplads

Boring	T (m <sup>2</sup> /s)	S (-)	Q (m <sup>3</sup> /h)	r <sub>w</sub> (m)	s <sub>w</sub> (m)	t (min)	skinfaktor
1	0.00169	0.0001	33	0.1125	6.7	60	-0.33
3	0.00160	0.0001	24.5	0.08	3.34	16	-2.81
4	0.00130	0.00005	49.5	0.125	4.75	16.7	-4.74
5	0.00200	0.0003	35	0.125	2.25	16.7	-3.98
6	0.01000	0.0001	87	0.125	1.32	16.7	-4.81
7	0.01200	0.0001	77	0.125	4.6	16.7	7.90
8	0.01500	0.0001	141	0.125	6.68	16.7	7.65
9	0.03000	0.00015	109	0.150	0.71	16.7	-3.98
10	0.05300	0.00015	126	0.125	1.05	16.7	1.13

Skinfaktoren anvendes til at bestemme det lineære boringstab (faktoren  $B$  i afsnit 2.1.3). Følgende formel er udledt i Halford and Hanson (2002) for isotropt grundvandsmagasin:

$$B = \frac{\sigma}{2\pi T}$$

Det lineære formationstab i en boring (faktoren  $A$  i afsnit 2.1.1), som repræsenteres i en grundvandsmodel relaterer sig til størrelsen af modellens beregningsnet. I tilfælde af isotropt grundvandsmagasin og kvadratiske beregningselementer bestemmes  $A$  til:

$$A = \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right)}{2\pi T}$$

Hvor  $r_0$  – boringens effektive udvendige radius, som bestemmes til:

$$r_0 = 0.20\Delta x$$

Hvor  $\Delta x$  – beregningsnettets størrelse.

Der er ikke undersøgt for ikke-lineære effekter under prøvepumpningsforsøgene, men den efterfølgende kalibrering vil vise, om det er nødvendigt at inddrage det ikke-lineære led i beregningerne.

### 3.2.3 Bestemmelse af pumpekaraktistikker

Pumpekaraktistikkerne for de enkelte borer er bestemt ud fra sammenhørende målinger af tryk, vandspejl i boringen og oppumpning ved hver enkelt boring. Trykket måles ved et manometer på en målestuds, som er placeret tæt på boringens tilslutning til ledningsnettet. Dvs. der skal ved beregningerne tages hensyn til et tryktab i stigrøret.

Tryktabet i stigrøret beregnes ud fra en iterativ formel kaldet Colebrook and Whites formel ([http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy\\_friction\\_factor\\_formulae](http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy_friction_factor_formulae)) kombineret med

Darcy Weisbach's ligning for beregning af tryktab i fuldtløbende rør. Først bestemmes friktionsfaktoren  $f$  ud fra følgende formel:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

hvor  $f$  – friktionsfaktor

$\varepsilon$  – ruheden

$D_h$  – indvendig rørdiameter

$Re$  - Reynolds tal ( $=v*r/\nu$ )

$v$  – hastigheden

$r$  – indvendig radius

$\nu$  – viskositeten.

Herefter beregnes tryktabet som følger:

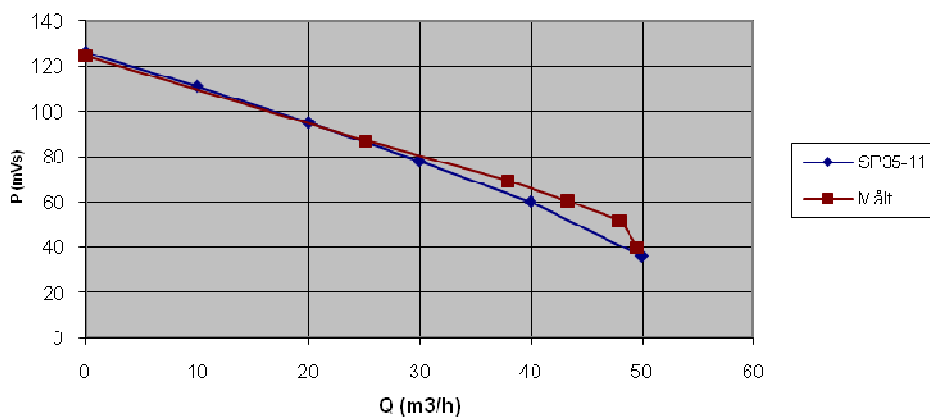
$$\Delta H = f \left( \frac{L}{D_h} \right) \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

hvor  $\Delta H$  – tryktabet

$L$  – længden af røret

$g$  - tyngdeaccelerationen.

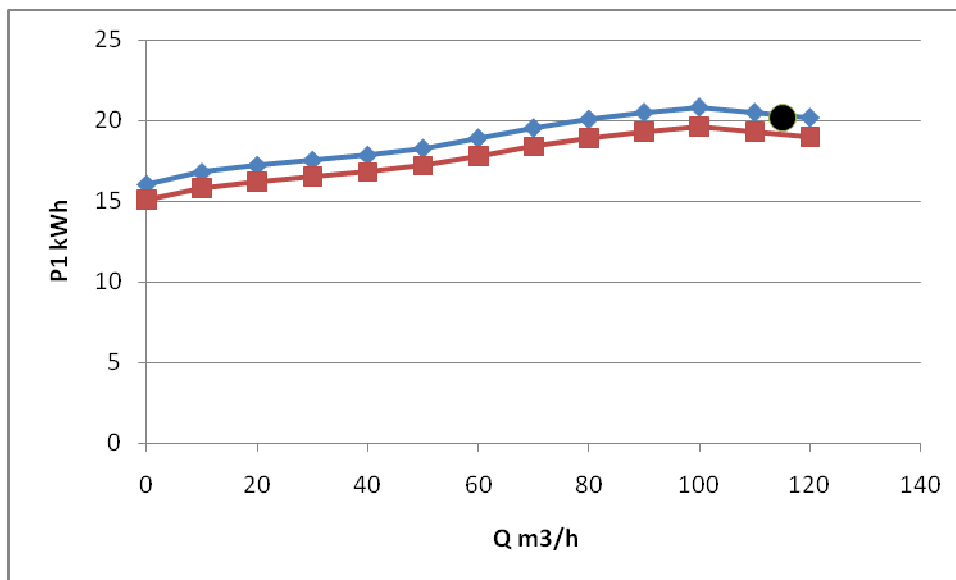
De målte sammenhørende værdier af tryk, oppumpning og vandspejl fremgår af prøve-pumpningsskemaerne i Bilag 2.1. Figur 3.1 viser en typisk sammenligning af målt og oprindelig karakteristik for en pumpe; der er i de fleste tilfælde god overensstemmelse.



Figur 3.1 Alle pumpekarakteristikker er bestemt ud fra målinger og sammenlignet med fabrikskarakteristikker

I Bilag 2.3 er alle pumpekarakteristikkerne samlet. Heraf fremgår, at karakteristikker for pumperne i Boring 1, 7 og 8 afviger mest fra deres fabrikskarakteristikker.

Energiforbruget er ligeledes målt, men det har ikke kunnet lade sig gøre at måle energiforbruget som funktion af ydelsen selvom der er en (lille) variation. For at skabe energiforbrugskurven er der derfor foretaget skalering ud fra boringens fabrikskurve ved at parallelforskyde kurven, så det målte punkt indgår. Nedenstående Figur 3.2 viser et eksempel på beregningen af energikurven for en af pumperne på kildepladsen.



Figur 3.2 Energiforbrugskurven for pumpen i Boring 9 viser, at der er et lidt større energiforbrug i pumpen end foreskrevet af fabrikkens. Den røde linje viser fabrikskurven, mens den blå linje er den beregnede nuværende energikurve. Den sorte prik markerer den målte sammenhæng

Yderligere angives tabet i motoren ved angivelse af en tabsprocent; her anvendes de for pumpen opgivne fabrikstal, som i øvrigt varierer ganske lidt fra pumpe til pumpe.

### 3.2.4 Måling af trykvariationer i råvandsnettet

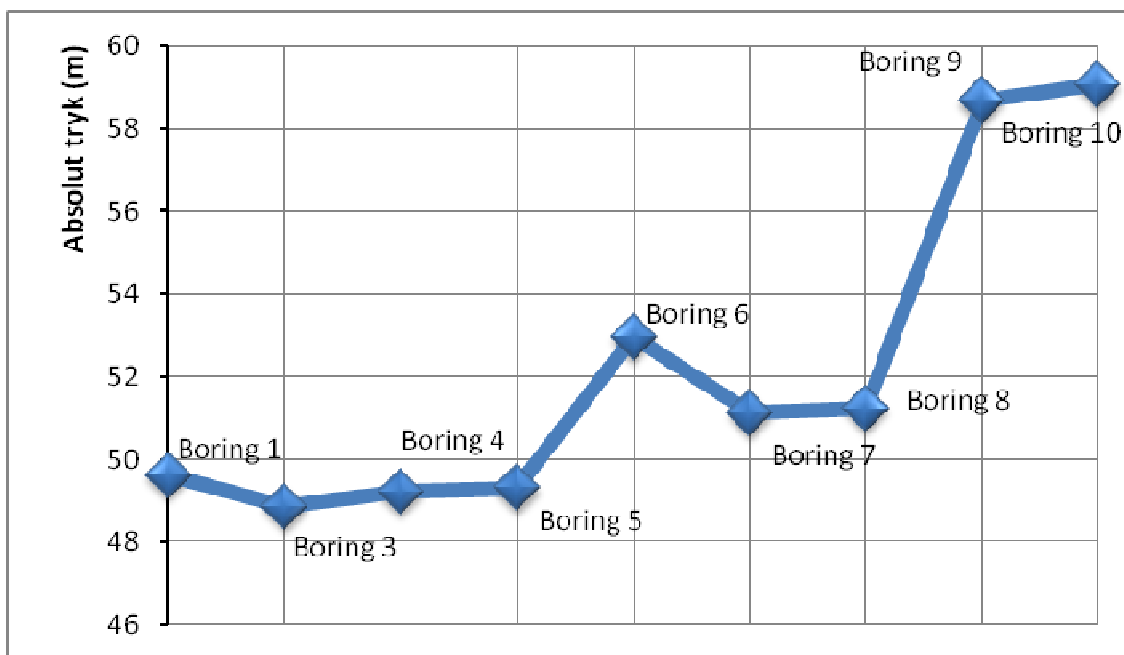
#### Første målekampagne

Der er over en periode på nogle dage foretaget trykmålinger i råvandssystemet med tilhørende måling af vandføringen med forskellige borer i drift. Disse målinger vil indgå i kalibreringen af ledningsnetsmodellen for ledningsnettet.

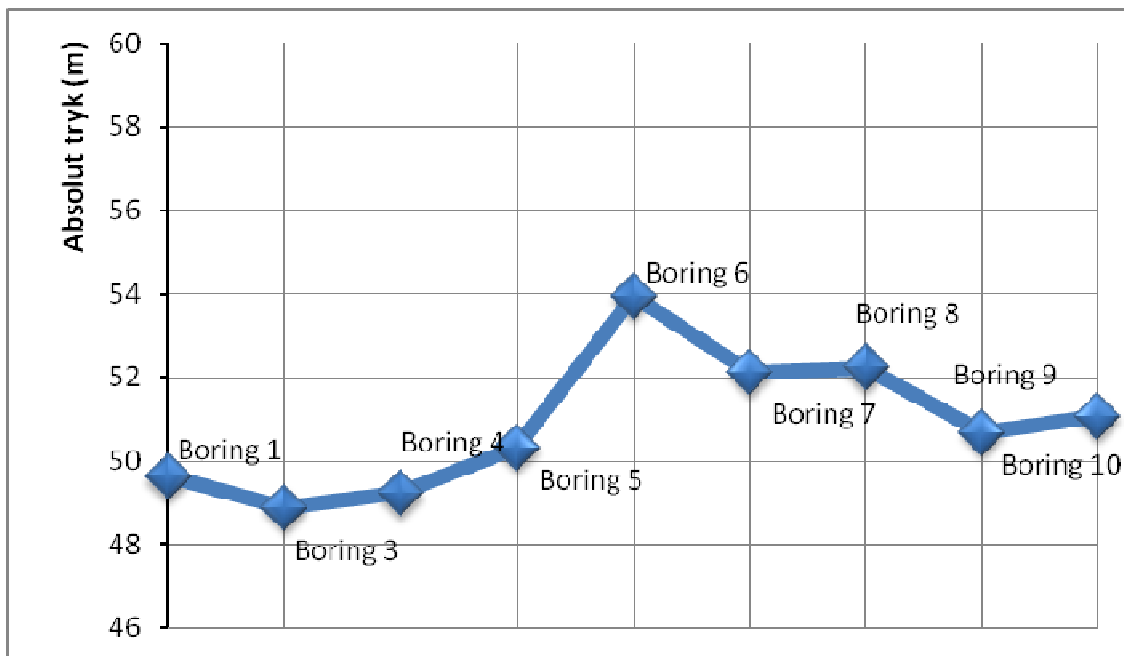
Målepunkter til alle borer er indmålt af landmålere og koten til manometerstudsen er indmålt i forhold hertil. Studsen er i alle borer placeret mellem boring og kontraventil til ledningsnettet.

I første omgang er der målt med relativt simple manometre, og det viser sig, at der skal en ny målerunde til for at få realistiske værdier. Figur 3.3 viser den målte trykfordeling ved samtidig produktion på boring 9 og 10 med i alt 235 m<sup>3</sup>/time. Iltningstrappen er beliggende tæt ved boring 1 med en udløbskote på 49.15 m. På figuren bevæger vandet sig således fra boring 10 og 9 mod boring 1 (se også Bilag 1 for nærmere optegning af råvandsledningsnettet). Trykket ved boring 10 er som forventet højere end trykket ved boring 9 og nedefter. Trykket ved boring 7 og 8 er næsten identisk, hvilket også er forventet da disse sidder på samme sted på råvandsledningen. Trykket ved boring 6 er derimod noget højere end forventet (ca. 3 m). En kontrolberegning med EPANET modellen (ikke koblet til grundvandsmodellen) viser, at de målte tryktab i ledningsnettet er væsentlig

større end forventet. Figur 3.4 viser en lignende situation med produktion fra boring 7 og 8.



Figur 3.3 Målt trykfordeling i råvandsnettet med produktion fra boring 9 og 10 med en samlet produktion på 235 m<sup>3</sup>/time



Figur 3.4 Målt trykfordeling i råvandsnettet med produktion fra boring 7 og 8 med en samlet produktion på 224 m<sup>3</sup>/time

### Anden målekampagne

Anden målekampagne blev gennemført med væsentlig bedre manometre, hvor det er muligt at aflæse trykket (i bar) med 2 decimaler. Det vil sige, at der umiddelbart er  $\pm 10$

cm usikkerhed på en trykmåling. Samtidig er der usikkerhed på koten til målepunkt ved boringen.

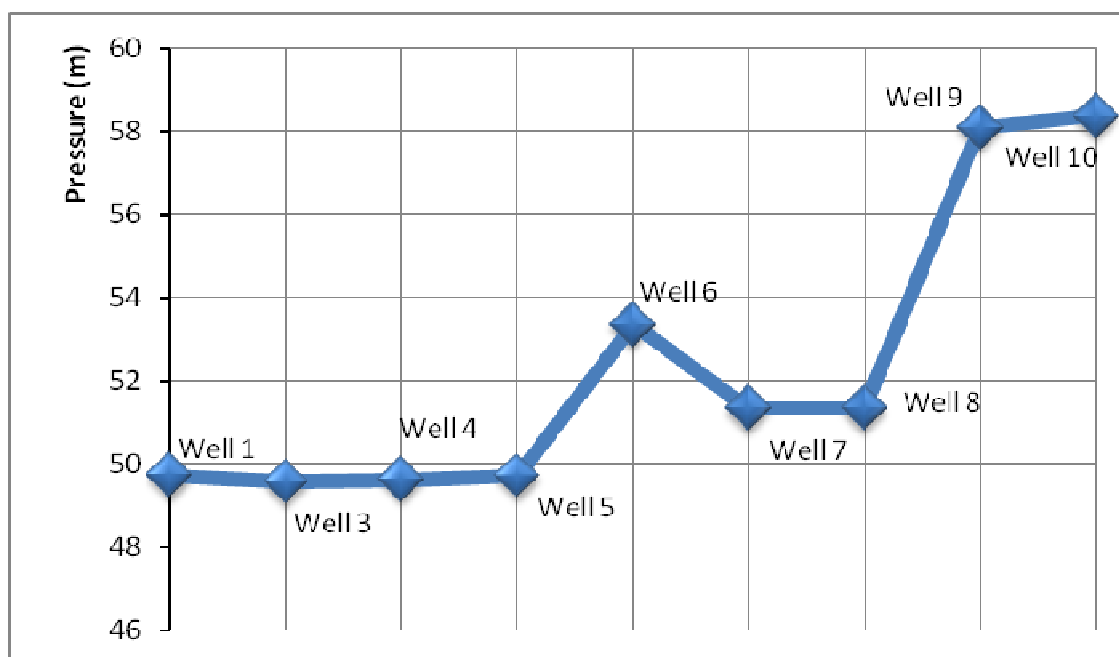
Et eksempel på resultater fra målekampagnen er vist i Figur 3.5. Figuren viser trykfordelingen ved en samlet produktion fra Boring 9 og 10 på  $235 \text{ m}^3/\text{time}$ . Der er to forhold i den målte trykfordeling, som springer i øjnene, nemlig trykket ved Boring 6, som åbenlyst er for højt og det store tryktab mellem Boring 8 og 9. Rørdimensionen på den ca. 350 m lange strækning varierer fra 250 til 315 mm, og der forventes ikke tryktab i denne størrelsesorden.

Forholdene ved Boring 6 blev herefter undersøgt ved gentagne ommålinger, og konklusionen blev, at der måtte være fejl i fastsættelsen af koten til boringens målepunkt.

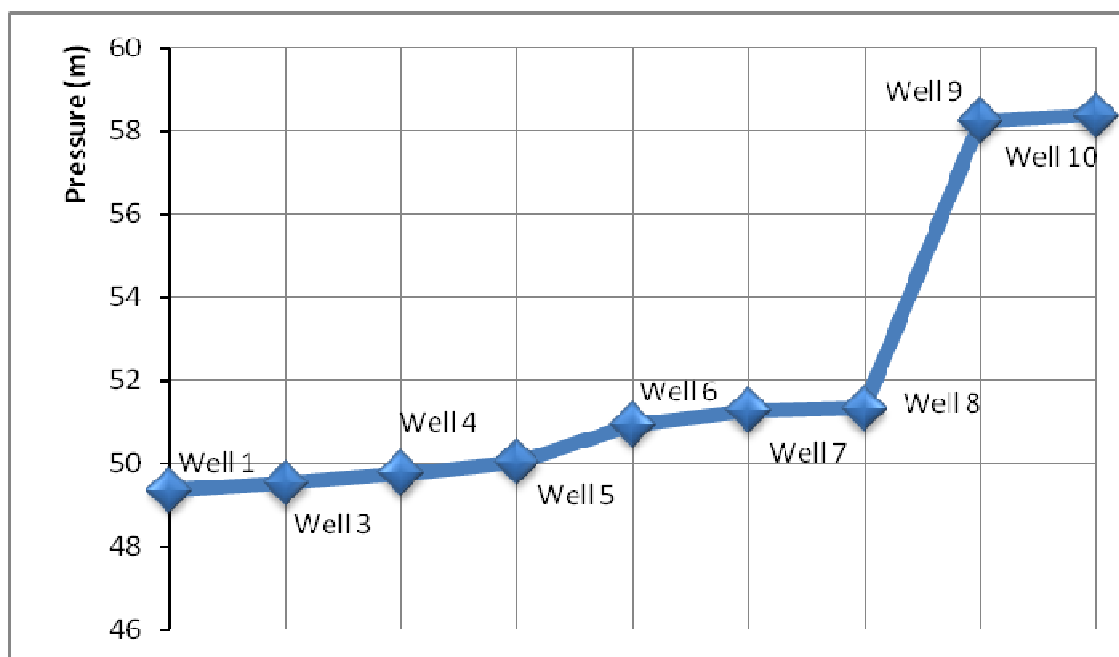
Forholdene mellem Boring 8 og 9 er endnu ikke undersøgt, men resultater fra ledningsnettsmodellen tyder på, at der eventuelt kan være en luftlomme eller på anden vis være en obstruktion i røret. En anden forklaring kan være, at kontraventilerne på **både** Boring 9 og 10 "hænger".

En efterfølgende ny opmåling af koter til målepunkter resulterede i en justering af koten ved Boring 6 på 2.45 m samt flere andre mindre justeringer. Figur 3.6 viser trykforholdene efter justering af målepunktskoter, hvilket giver et væsentlig mere realistisk billede med et konstant faldende tryk fra Boring 10 mod iltningstrappen ved Boring 1.

Samtlige resultater af trykmålingerne fremgår af Bilag 2.4.



Figur 3.5 Målt trykfordeling i råvandsnettet med produktion fra boring 9 og 10 med en samlet produktion på  $235 \text{ m}^3/\text{time}$  – før kontrol af koter til målepunkter



Figur 3.6 Målt trykfordeling i råvandsnettet med produktion fra boring 9 og 10 med en samlet produktion på 235 m<sup>3</sup>/time – **efter** kontrol af koter til målepunkter

## **4 MODELUDVIKLING FOR BIRKERØD VANDFORSYNING**

Udviklingen af kildepladsmodellen på basis af den gennemførte målekampagne er et vigtigt led i forsøget på at optimere energiforbruget på Birkerød Vandforsynings kildeplads.

### **4.1 Grundvandsmodel**

Et af de essentielle elementer i kildepladsmodellen er en grundvandsmodel for kildepladsen, som kan beskrive trykforholdene i grundvandsmagasinerne og afsænkningen i indvindingsboringerne. Herved kan løftehøjden for den enkelte pumpe bestemmes.

De vigtigste, styrende parametre i denne sammenhæng er grundvandsmagasinerne geometriske begrænsninger og hydrauliske egenskaber udtrykt gennem transmissivitet, magasintal og hydrauliske ledningsevner.

#### **4.1.1 Oplandsmodel**

Miljøcenter Roskilde er i gang med at udvikle en integreret grundvands- og overfladevandsmodel for hele Sjælland. I den sammenhæng er der indsamlet en lang række data og informationer, som modelarbejdet i nærværende projekt har kunnet udnytte. Sjællandsmodellen er endnu ikke færdigudviklet, men i området, som dækker det tidligere Frederiksborg Amt er der arbejdet meget med modeludviklingen. Miljøcenter Roskilde har venligst udlånt Sjællandsmodellen med tilhørende data i form af klimadata og indvindingsdata til modelafvikling og grundvandspejlinger og vandløbsafstrømninger til modelkalibrering.

Modellen har dannet udgangspunkt for udvikling af en oplandsmodel for Donse Å og Usserød Å's opland, som dækker et område på ca. 83 km<sup>2</sup> inklusiv Sjælsø. Ved i første omgang at udvikle en oplandsmodel kan registrerede afstrømningsmålinger i vandløbene anvendes til at holde styr på vandbalancen og dermed forholdet mellem grundvandsdannelsen og den overfladenære afstrømning. Dette sikrer igen, at modellens grundvandshydrauliske parametre kan kalibreres med større sikkerhed end ved en "ren" grundvandsmodel", hvor grundvandsdannelsen angives eksplicit. Efterfølgende er oplandsmodellen videreudviklet til Usserød grundvandsmodel.

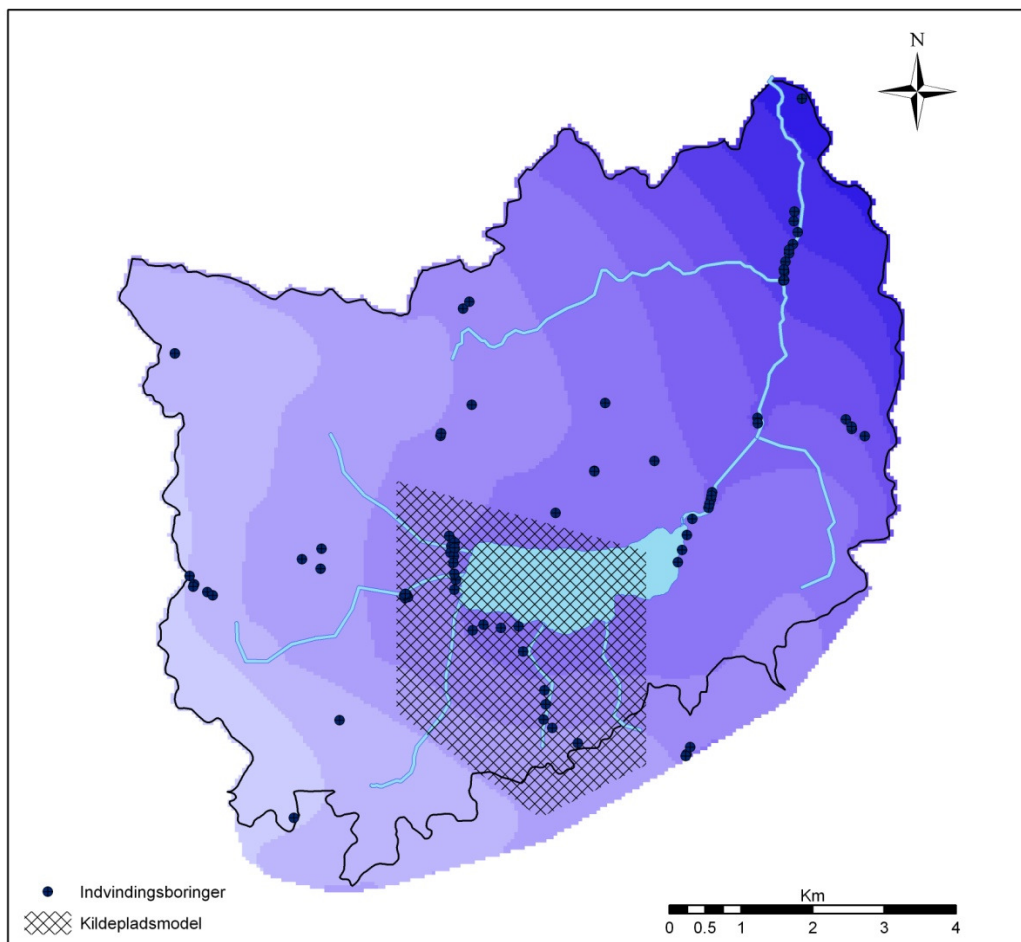
Datagrundlaget og diverse justeringer af oplandsmodellen er beskrevet i Bilag 4.

#### **4.1.2 Grundvandsmodel for kildepladsen**

Der er foretaget målinger af transmissiviteten og magasintal i alle borerne på Birkerød Vandforsynings kildeplads. Disse målinger danner, som omtalt i Bilag 4, grundlag for en opdatering af den hydrogeologiske model, som ligger til grund for grundvandsmodellen.

Usserød grundvandsmodel er inddelt i et beregningsnet på 50x50 m, men for at kunne opløse grundvandspotentialerne tilstrækkeligt fint på kildepladsen, er der udskåret en model med 25 m net (Birkerød grundvandsmodel) - Figur 4.1. Denne model dækker selvfølgelig kildepladsen, men også tilstødende arealer er medtaget for at minimere indflydelsen fra modelranden. Modellen, som i første omgang anvender præcis samme hydrogeologiske og øvrige data som Usserød grundvandsmodel, kan modtage randbetingelser fra Usserød-modellen i form af tidsvarierende tryk og vil anvende den samme

infiltrationsberegning som Usserød grundvandsmodel. Som ydre randbetingelse er der anvendt fastholdt (tidsvarierende) tryk i alle modellag, mens Sjælsø og vandløbene er indlagt som fastholdt tryk i øverste beregningslag ligesom i Usserød grundvandsmodel.

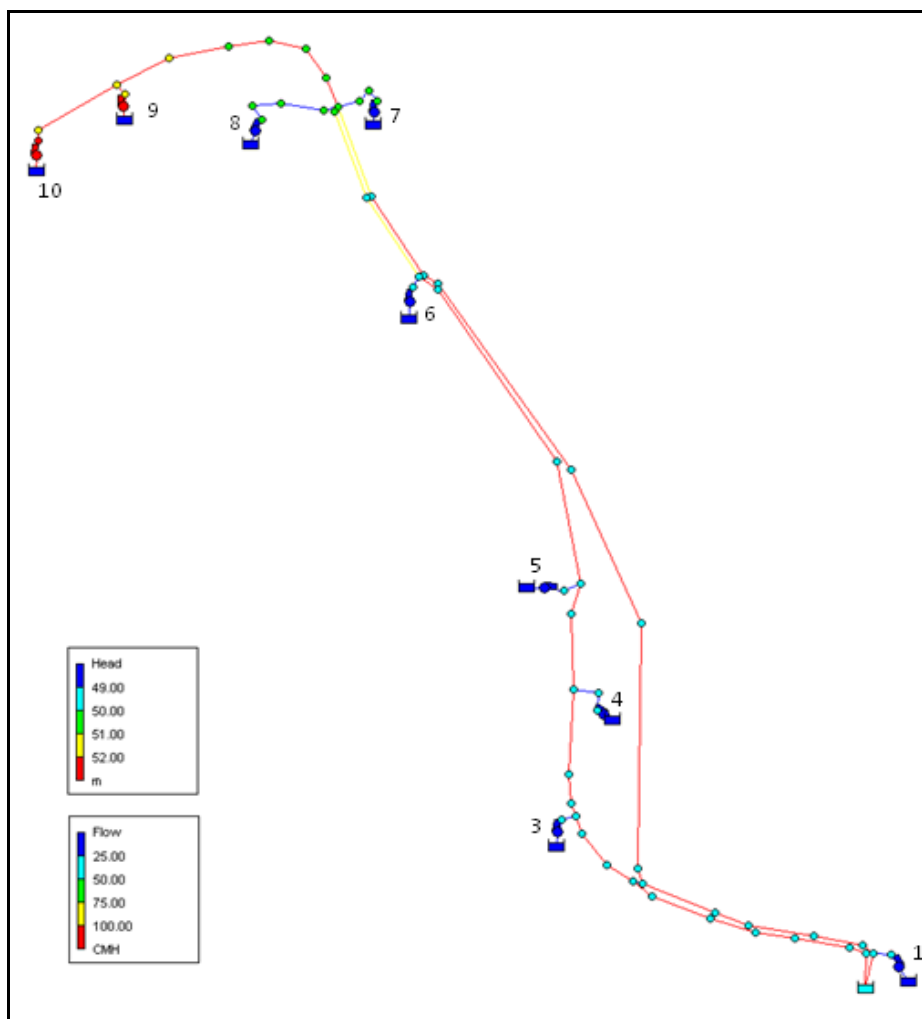


Figur 4.1 *Birkerød grundvandsmodel med et beregningsnet på 25x25 m dækker vandforsynings kildepladsområde samt et område uden for dette for at minimere indflydelsen af randbetin- gelsen. Det bemærkes, at den nærliggende kildeplads til Nordvand forsyning ligeledes er medtaget*

## 4.2 Ledningsnetmodel

Til beskrivelse af tryk og flow i råvandssystemet er der udviklet en EPANet baseret ledningsnetmodel for råvandssystemet på Birkerød Vandforsynings kildeplads. Der er indlagt pumpekaraktistikker for indvindingsboringerne både for så vidt angår fabriks- karakteristikkere (data venligst fremskaffet af Grundfos) og de målte karakteristikkere jævnfør måleprogrammet på kildepladsen.

Modellen er i første omgang bygget op, så den kan køre som selvstændig model, idet grundvandsmagasinet er indlagt som et antal reservoirer i forbindelse med hver pumpe. Reservoirerne er givet et trykniveau svarende til de under drift registrerede vandspejl i de respektive boringer. Udløbet ved iltningstrappen på vandværket er bestemt til kote 49.15. Alle ledningsstrækninger er indlagt med deres korrekte (oprindelige) dimension, som vist på Figur 4.2, og er initialt givet en ruhed på 1 cm.



Figur 4.2 Råvandsnettet er 2-strengt fra boring 7/8 og frem til værket. Den viste simulering (head, flow) er med boring 9 og 10 i drift, hvor trykket stiger til omkring 52 m faldende til 49.15 ved udløb iltningstrappe på vandværket

Der er opbygget 2 selvstændige ledningsnettsmodeller; én som anvender de fabriksangivne pumpekaraktistikker for alle pumper og én, som anvender de under målekampagnen målte karakteristikker (DANVA, 2009). Modellerne kan som sådan simulere råvandssystemet uden kobling til grundvandet, idet borerne er angivet som reservoir randbetingelser med et vandspejl tilnærmelsesvis svarende til grundvandsspejlet under drift (dette tryk varierer jo afhængig af hvilke borer, der er i drift, ligesom der er en indflydelse fra den nærliggende kildeplads tilhørende Nordvand Forsyning).

#### 4.2.1 Kalibrering af ledningsnettsmodel

Kalibreringen af ledningsnettsmodellen indebærer to forhold, som er indbyrdes afhængige, nemlig en justering af pumpekaraktistikkerne så pumperne giver den rette vandmængde ved den (beregnete) løftehøjde og en justering af ruheder i rørsystemet for at genskabe de målte trykfordelinger i ledningsnettet. Desuden er udløbskoten justeret i modellen, så trykket ved boring 1, som ligger umiddelbart ved udløbet til iltningstrappen, afspejler udløbskoten.

Kalibreringen er foretaget som en "trial and error" kalibrering, dvs. der er ikke anvendt nogen form for automatisk kalibreringsteknik. Modellen er kalibreret mod 4 forskellige kombinationer af pumper i drift, hvor der i alle tilfælde er foretaget målinger af pumpe-

ydelsen og trykforhold ved hver boring. Trykmålingerne er foretaget opstrøms kontraventil mellem boring og ledningsnet. Det er tilstræbt ved kalibreringen, at forskellen mellem målt og beregnet tryk er mindre end 25 cm, men i mange tilfælde er det væsentligt lavere. Det skal bemærkes, at det målte tryk (i bar) kun kan aflæses med 2 decimalers nøjagtighed, hvilket betyder, at der umiddelbart er  $\pm 10$  cm usikkerhed på målingerne. Samtidig er der usikkerhed på koten til målepunkt ved boringen. Alt i alt betyder dette, at en kalibrering med en overensstemmelse på maksimalt 25 cm er tilstrækkelig.

De 4 pumpekonfigurationer, som er anvendt til kalibrering er:

- a) Boring 9 og 10 i drift – samlet oppumpning  $240 \text{ m}^3/\text{time}$
- b) Boring 7 og 8 i drift – samlet oppumpning  $225 \text{ m}^3/\text{time}$
- c) Boring 6 og 7 i drift – samlet oppumpning  $173 \text{ m}^3/\text{time}$
- d) Boring 1, 3, 4 og 5 i drift – samlet oppumpning  $125 \text{ m}^3/\text{time}$ .

Oppumpningen fra de enkelte boringer er ikke specifikt kendt i disse kombinationer, da der ikke er flowmålere på hver enkelt boring, men den samlede indpumpning på vandværket er registreret. Udover dette er der registreret et energiforbrug på den enkelte pumpe.

I en senere prøverunde er indvindingen ved hver enkelt boring registreret, hvilket har givet grundlag til at bestemme fordelingen mellem boringerne i ovenstående kombinationer. Under denne prøverunde er vandspejlet i pumpeboringerne ligeledes målt under drift. Samtidig giver de målte pumpekarakteristikker et godt grundlag for at bestemme den reelle indvinding ved hver boring.

I første omgang er det målte grundvandstryk i alle boringer i drift anvendt som trykniveau i de reservoirer, som beskriver grundvandssystemet i ledningsnetsmodellen. Herefter er pumpekarakteristikkerne justeret så den simulerede oppumpning svarer til de registrerede samtidig med, at det simulerede tryk ved boringen svarer til det målte. Her er det så nødvendigt samtidig at justere modstanden i ledningsnettet, da dette influerer på trykket ved boringen. Justeringen af pumpekarakteristikkerne fremgår af nedenstående Tabel 4.1. Justering af karakteristikkene for pumperne i boring 3, 4 og 5 er forventet, da de målte karakteristikker er en smule bedre end fabrikskarakteristikkene. Det samme gør sig gældende for pumperne i boring 7 og 8, hvor karakteristikkene ligger noget under fabrikskarakteristikkene. Pumperne i boring 6, 9 og 10 ligger alle meget tæt på deres fabrikskarakteristikker, og det er derfor heller ikke overraskende, at disse kan anvendes uændret i modellerne. Kun pumpekarakteristikken for pumpen i boring 1 giver en mindre forventet justering, men det kan hænge sammen med, at der ikke er målt i dens optimale driftsområde.

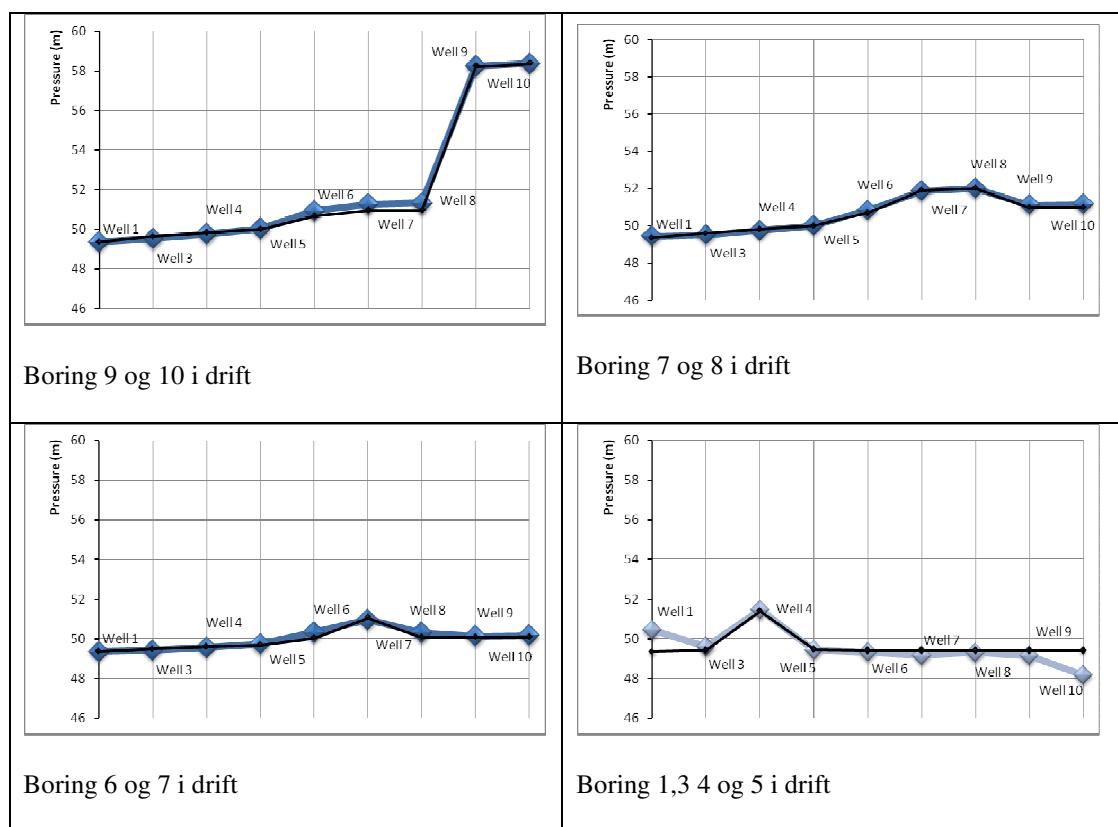
Tabel 4.1 Pumpekarakteristikkerne er justeret under kalibrering af ledningsnetsmodellen både ved at skalere kurven op og ned og ved ændring af hældningen i visse tilfælde

Boring	1	3	4	5	6	7	8	9	10
Justering	+10%	-10%	-5-10%	-5-10%	Uændret	+10%	+10%	Forlænget	Uændret

I forbindelse med justeringen af modstanden i ledningsnettet er der i videst muligt omfang benyttet enkelttab angivet med en såkaldt "loss coefficient" i stedet for at justere ruheden på lange ledningsstrækninger. Dette dækker så over, at der er tab ved kontraventiler, overgange mellem rørdimensioner, bøjninger, forgreninger mv., men også hvis der er større aflejringer på visse strækninger eller f.eks. luftlommer i systemet, som giver anledning til tryktab.

Som omtalt under beskrivelsen af trykmålinger tyder noget på, at der er en større modstand på strækningen mellem boring 8 og boring 9, hvor trykket falder mere end 6 m i ledningsnettet. Dette er simuleret med angivelse af en loss coefficient på denne strækning. Det har ligeledes været nødvendigt at angive enkelttab ved boring 8 før udløbet ved ledningsnettet. Her falder trykket med ca. 3 m, når pumpen er i drift. Disse enkelttab kan dække over kontraventiler, som hænger eller andre uheldsmæssigheder ved borerne. Ruheden er kalibreret til 2 cm for hele ledningsnettet, hvilket giver den bedste overensstemmelse mellem det målte og det simulerede tryktab i området fra boring 7/8 og frem til vandværket.

Figur 4.3 viser det samlede billede med både de målte og de simulerede trykniveauer i ledningsnettet.



Figur 4.3 Der er opnået en god overensstemmelse mellem målte og beregnede trykforhold i ledningsnettet ved de 4 pumpekonfigurationer. Bemærk tryktabet mellem boring 8 og 9 ved den ene kombination (målingen er repræsenteret ved den fede, blå signatur og den simulerede er repræsenteret ved den tynde, sorte signatur)

## 5 KILDEPLADSMODEL

### 5.1 Udvikling

Udviklingen af kildepladsmodellen indebærer, at grundvandsmodellen og ledningsmodellen kobles sammen, og at der angives et sæt parametre for hver boring. Dette foregår pt. via tekst-filer uden brugerinterface, men med samme tekststruktur som i alle input-filer til DHI's MIKE modeller.

For hver boring specificeres følgende i parameterfilen (se Figur 5.1):

- ID i ledningsnettsmodellen og beskrivelse (f.eks. DGU nummer)
- Placering (x,y)
- Antal filtre og for hver filter:
  - o Kote til top af filter
  - o Kote til bunden af filter
  - o Indvendig radius
  - o Skinfaktor
  - o Ikke-lineær tabsfaktor og ikke-lineær tabseksponent.

```
[well1]
ID = '201'
Description = '193.23G'
Terrain = 0
Bottom = 0
X = 715540
Y = 6194300
[Casing1]
  ID = 'c1'
  [Screen1]
    ID = 's1'
    Top = 3
    Bottom = -7
    Radius = 0.1125
    Skin = -0.33
    NonLinearExponent = 0
    NonLinearCoefficient = 0
  EndSect // screen1

  NumberOfScreens = 1
  NumberOfPumps = 0
EndSect // Casing1

NumberOfMNCs = 1
EndSect // well1
```

Figur 5.1 Parameterværdier for hver boring angives i en parameterfil som input til wellness programmet

Der er i første omgang udviklet en model med de målte skinfaktorer og de beregnede energiforbrugs kurver.

## 5.2 Kalibrering og validering

Efter kalibreringen af grundvandsmodellen til at kunne afspejle målte grundvandspotentialer i enkelte observationsboringer, og ledningsnetmodellen til at afspejle trykvariationer i råvandsnettet, er kalibreringen af kildepladsmodellen *wellness* en arbejdsproces, hvor man skal have kalibreret de to modeller op mod hinanden. Med det foreliggende datagrundlag er det basalt set et spørgsmål om at justere skinfaktorerne, så det beregnede trykniveau i boringer i drift svarer til det målte – herefter vil ledningsnetmodellen give samme resultat som under kalibreringen af denne. Hvis der havde været tryk og flow data til rådighed fra oppumpningsscenarioer med varierende ydelse kunne det være relevant at justere på de ikke-lineære tabsled (eksponent og koefficient).

Skinfaktoren i *wellness* modellen er ikke den samme som den ”målte” skinfaktor, idet denne parameter indgår i beregningen af afsænkningen i boringen i forhold til den beregnede grundvandsstand i grundvandsmodellens beregningspunkt. Altså en parameter, som er afhængig af diskretiseringen af grundvandsmodellen og lokaliseringen af boringen i beregningsnettet. Der er dog en vis sammenhæng, og man vil alt andet lige forvente, at meget effektive boringer med store negative målte skinfaktorer, vil resultere i negative model skinfaktorer og omvendt for mindre effektive boringer.

Som det fremgår af Tabel 5.1 er der en vis overensstemmelse mellem de målte og kalibrerede skinfaktorer.

For sammenligningens skyld er virkningsgraden for boringerne ligeledes vist, og som forventet ligger de fleste kalkboringer med endog meget høje virkningsgrader, mens grusboringen ligger på lige godt 100%, hvilket er det maksimalt opnåelige for en grusboring.

Tabel 5.1 Kalibreret og målt skinfaktor for de enkelte boringer sammenholdt med den beregnede virkningsgrad

Boring	T (m <sup>2</sup> /s)	S (-)	Q (m <sup>3</sup> /h)	Kalibreret skinfaktor	Målt skinfaktor	Målt virkningsgrad
1	0.00169	0.0001	33	-4.4	-0.33	104%
3	0.00160	0.0001	24.5	-0.25	-2.81	157%
4	0.00130	0.00005	49.5	-2.8	-4.74	268%
5	0.00200	0.0003	35	-3.1	-3.98	237%
6	0.01000	0.0001	87	-3.0	-4.81	240%
7	0.01200	0.0001	77	13.0	7.90	51%
8	0.01500	0.0001	141	13.0	7.65	52%
9	0.03000	0.00015	109	-7.5	-3.98	190%
10	0.05300	0.00015	126	-5.7	1.13	89%

Der er efterfølgende foretaget en form for validering af modellen mod den målte oppumpning og det målte energiforbrug på kildepladsen for så vidt angår driften i 2008. Ud fra registreringer i vandforsyningens scada system har det været muligt at bestemme, hvilke boringskombinationer, der er kørt med i 2008, og hvor mange timer de enkelte kombinationer har kørt. Ved at gennemregne alle kombinationer og herefter korrigere for antal driftstimer for hver kombination, kan den samlede oppumpning og det samlede energiforbrug på kildepladsen beregnes.

Med 9 boringer er der i alt  $2^9 = 512$  kombinationer, men det er kun de 122 af disse, som har indgået i de anvendte boringskombinationer. Antallet af driftstimer for hver kombination varierer fra 1 time til 555 timer. Modellen beregner en samlet oppumpning på  $1.405.000 \text{ m}^3$  og et energiforbrug på  $266.321 \text{ kWh}$ , som skal sammenlignes med tilsvarende målte tal på  $1.348.500 \text{ m}^3$  og  $270.618 \text{ kWh}$ . Det målte energiforbrug svarer til et specifikt forbrug på  $0.201 \text{ kWh/m}^3$ .

Det er således muligt med anvendelse af de målte værdier for pumpekarakteristikker og energiforbrug samt kalibrering af trykforhold i ledningsnettet at ramme det målte energiforbrug indenfor 1,6% og den målte indvinding indenfor 4%. Dette vil naturligvis kunne forbedres gennem yderligere justering af modelparametrene, men ikke uden at gøre vold på de udførte målinger, og er et udtryk for nøjagtigheden af de absolutte tal i de gennemførte beregninger samt måleunøjagtigheder. Usikkerheden på scenarieberegninger er traditionelt langt mindre, da det er forskelle mellem modelberegninger, der fokuseres på.

Det modellerede forbrug giver således et specifikt energiforbrug på  $0.189 \text{ kWh/m}^3$ , mens målingerne har vist et forbrug på  $0.201 \text{ kWh/m}^3$ , se Tabel 7.1. I de efterfølgende scenarier er der sammenlignet med det modellerede forbrug, men det betyder formentlig, at de beregnede energibesparelser er på den sikre side.

## 6 **FORSLAG TIL UDSKIFTNING AF PUMPER BASERET ALENE PÅ MÅLEKAMPAGNEN**

Baseret på de opmålte pumpekaraktistikker har Grundfos foreslået 2 scenarier med udskiftning af pumper med henblik på at vurdere energibesparelsespotentialer på kildepladsen. De 2 scenarier er baseret på følgende generelle forudsætninger:

- 1) alle pumper kører det samme antal timer på et år
- 2) pumperne kører "alene" - dvs. der er ikke taget hensyn til modtryk i ledningsnettet fra andre pumper i drift
- 3) der sker ikke nogen ændring i grundvandsspejlets beliggenhed ved ændring i pumpemængderne (med andre ord skal pumpen præstere en trykhøjde svarende til hvad der er målt).

Scenario I baseres endvidere på, at de nye pumper skal yde det samme som de eksisterende pumper og altså være i drift omtrent det samme antal timer som de er nu. Scenario II baseres på mindre pumper, som i sagens natur skal køre i flere timer for at yde den samlede ønskede årlige vandmængde. I beregningerne er pumpeydelse og energiforbrug skaleret, så den samlede indvinding svarer til indvindingen i 2008. Herved bliver resultaterne sammenlignelige.

Resultaterne af scenarierne fremgår af Tabel 6.1 og Tabel 6.2. Ud fra disse kan følgende konkluderes:

- der er beregnet et besparelsespotentialer på 19% ved udskiftning til mere energirigtige pumper med samme ydelse og 20% ved udskiftning til mindre pumper svarende til godt 5.000 EUR eller knap 40.000 kr pr år (under antagelse af en kWh pris på 0.1 EUR);
- der er stor variation i besparelsespotentialer for de forskellige pumper. F.eks. kan der spares mere end 40% ved udskiftning af pumpen i boring 5, mens pumpen i boring 10 er tæt på at være optimal (denne pumpe er i øvrigt også skiftet inden for de seneste år, så dette resultat er ikke overraskende);
- forskellen mellem de 2 scenarier er lille. Dette skyldes primært, at der **ikke** tages hensyn til, at der forekommer mindre afsenkning ved mindre ydelse og mindre trykfald i ledningsnettet ved mindre flow; forhold, som tages i regning ved anvendelse af kildepladsmodellen i det efterfølgende.

I forbindelse med scenario II kan der opnås en betydelig besparelse ved at anvende de mest energirigtige borer mest. En optimeringsøvelse viser, at besparelsen på denne måde kan komme helt op på 26%, men det vil resultere i en væsentlig anderledes indvindingsstrategi ligesom der ikke er taget hensyn til maksimalforbrug og vandkvalitetsforhold.

Tabel 6.1 Resultaterne af scenario I baseret udelukkende på måleresultaterne viser, at der er et gennemsnitligt besparelsespotentiale på 19% ved at udskifte pumperne med mere effektive pumper - når pumpeydelsen skal fastholdes

Scenario I									
Well no.	Pump		Production [m3]		Energy consumption		Savings		
	Actual	New	Actual	New	Actual [kWh]	New [kWh]	kWh	Euro	%
1	SP 35-4	SP 30-4	87.563	87.574	14.572	11.450	3.121	€ 312	21%
3	SP 25-5	SP 30-4	69.244	69.278	13.245	10.801	2.444	€ 244	18%
4	SP 35-11	SP 46-5	135.326	135.358	33.197	23.465	9.732	€ 973	29%
5	SP 25-7	SP 30-4	79.232	79.917	20.225	11.530	8.694	€ 869	43%
6	SP 77-4B	SP 77-3	228.147	228.255	42.321	33.308	9.014	€ 901	21%
7	BPD 165-4	SP 77-3	219.172	218.204	39.168	32.740	6.428	€ 643	16%
8	SP 120-4	SP 125-2	210.213	210.233	41.038	35.293	5.744	€ 574	14%
9	SP 95-4	SP 95-3	158.076	158.103	28.151	24.557	3.594	€ 359	13%
10	SP 125-2	SP 125-2	161.528	161.579	29.451	27.560	1.890	€ 189	6%
			1.348.500	1.348.500	261.367	210.704	50.663	€ 5.066	19%

Tabel 6.2 Resultaterne af scenario II baseret udelukkende på måleresultaterne viser, at der er et gennemsnitligt besparelsespotentiale på 20% ved at udskifte pumperne med mere effektive pumper - med mindre pumper

Scenario II									
Well no.	Pump		Production [m3]		Energy consumption		Savings		
	Actual	New	Actual	New	Actual [kWh]	New [kWh]	kWh	Euro	%
1	SP 35-4	SP 17-3	62.864	62.885	10.462	7.283	3.179	€ 318	30%
3	SP 25-5	SP 17-4	49.712	49.881	9.509	7.513	1.995	€ 200	21%
4	SP 35-11	SP 30-5	97.154	96.916	23.833	16.505	7.329	€ 733	31%
5	SP 25-7	SP 17-4	56.883	56.800	14.520	8.442	6.078	€ 608	42%
6	SP 77-4B	SP 46-4	163.793	163.812	30.384	21.103	9.281	€ 928	31%
7	BPD 165-4	SP 46-4	157.351	157.554	28.120	22.800	5.320	€ 532	19%
8	SP 120-4	SP 77-3	301.836	301.789	58.924	45.461	13.462	€ 1.346	23%
9	SP 95-4	SP 60-5	226.975	226.842	40.421	37.796	2.625	€ 263	6%
10	SP 125-2	SP 60-5	231.931	232.022	42.287	38.618	3.669	€ 367	9%
			1.348.500	1.348.500	258.460	205.520	52.939	€ 5.294	20%

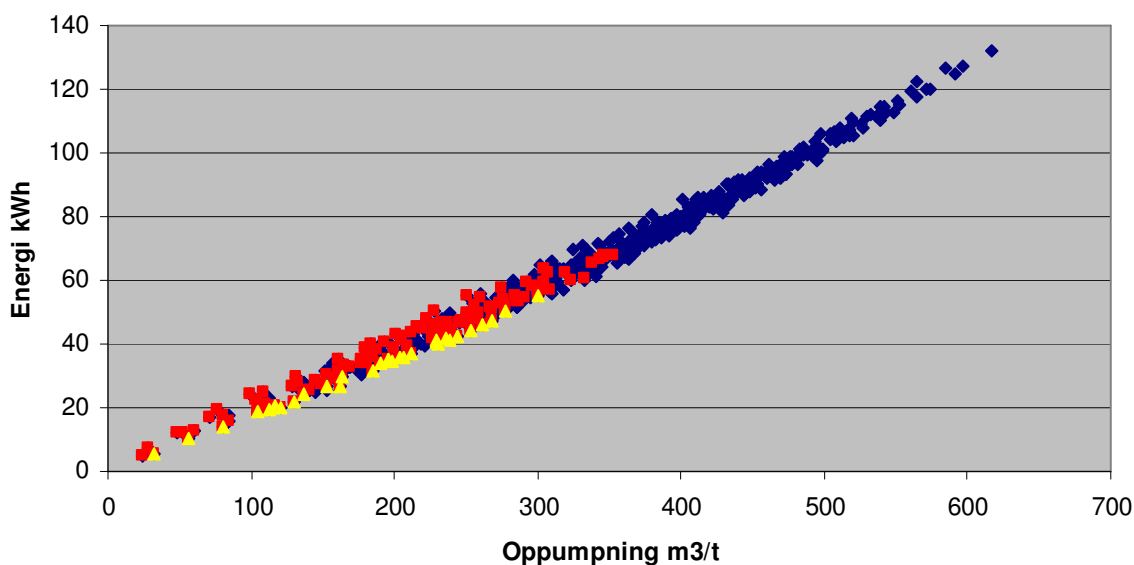
## 7 OPTIMERING AF BIRKERØD VANDFORSYNING KILDEPLADS BASERET PÅ ANVENDELSE AF KILDEPLADSMODELLEN

### 7.1 Basisscenarier

Energioptimeringen af indvindingen til Birkerød Vandforsyning tager udgangspunkt i 2008 situationen. I første omgang er der optimeret på 4 forskellige måder:

- 1) Vælge de mest energirigtige boringskombinationer med de eksisterende pumper
- 2) Udskifte eksisterende pumper med nye og mere energioptimale og bibeholde samme ydelse
- 3) Udskifte eksisterende pumper med nye og mindre pumper
- 4) Eliminere enkelttab i ledningsnettet.

Når der ændres på ledningstab, pumpekarakteristikker mv. vil modellen alt andet lige simulere andre pumpeydelse. Dermed bliver det vanskeligt at sammenligne det samlede energiforbrug fra de forskellige beregninger, og der er således fokuseret på det specifikke energiforbrug ved sammenligning mellem de forskellige scenarier. En nærmere analyse af de forskellige situationer viser, at der er et relativt stort besparelsespotentiale ved optimering og/eller udskiftning af pumper på kildepladsen. Således viser Figur 7.1 energiforbruget som funktion af den oppumpede vandmængde for alle de beregnede kombinationer. Spredningen af punkterne indikerer, at der er et ikke ubetydeligt potentiale for besparelse alene ved at anvende de mest energirigtige kombinationer. Figuren viser både alle kombinationer (blå markering) og de kombinationer, som vandforsyningen anvendte i 2008 driften (rød markering).



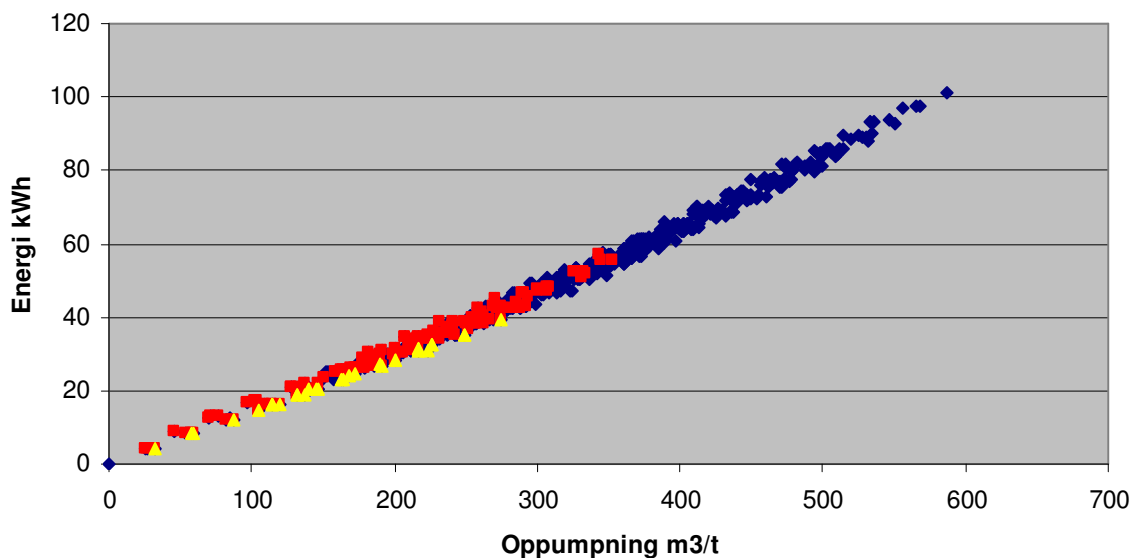
Figur 7.1 **Eksisterende pumper.** Energiforbruget ved forskellige pumpekombinationer som funktion af den oppumpede mængde. De blå markeringer angiver alle kombinationer, de røde markeringer angiver de reelt anvendte kombinationer og de gule markeringer angiver de 30 mest energieffektive kombinationer

Hvis for eksempel vandbehovet er 300 m<sup>3</sup>/time varierer energiforbruget mellem 53 og 64 kWh svarende til en forskel mellem den mest og mindst energirigtige kombination på ca. 20%. Selvfølgelig vil andre forhold såsom vandkvalitet, forsyningssikkerhed, restriktioner på pumpernes drift mv. sætte andre kriterier for oppumpningen, men perspektivet af denne betragtning er interessant fra et energimæssigt synspunkt.

Udvælges for eksempel de 30 mest energirigtige kombinationer ud af de 122, som forsyningen har anvendt i 2008, og anvendes disse kombinationer (hypotetisk) alene til at sikre hele årets forsyning, kan der spares ca. 7% energi eller ca. 18.000 kWh.

En udskiftning af pumper med tilsvarende pumper med en højere effektivitet vil reducere energiforbruget markant. Scenariet er beskrevet i kapitel 6 (Scenarie I). Figur 7.2 viser således en tilsvarende optegning af energiforbrug som funktion af indvindingsmængde for denne situation. Det er tydeligt at de mere moderne pumper har en langt fladere energikurve, hvilket bl.a. betyder, at spredningen på kombinationerne er mindre end med de eksisterende pumper. Med anvendelse af samme kombinationer af borer, som Vandforsyningen anvendte i 2008, resulterer beregningen i et samlet specifikt energiforbrug på 0.153 kWh/m<sup>3</sup>. Dette svarer til en besparelse på hele 19% i forhold til det modellerede forbrug med de nuværende pumper og kombinationer.

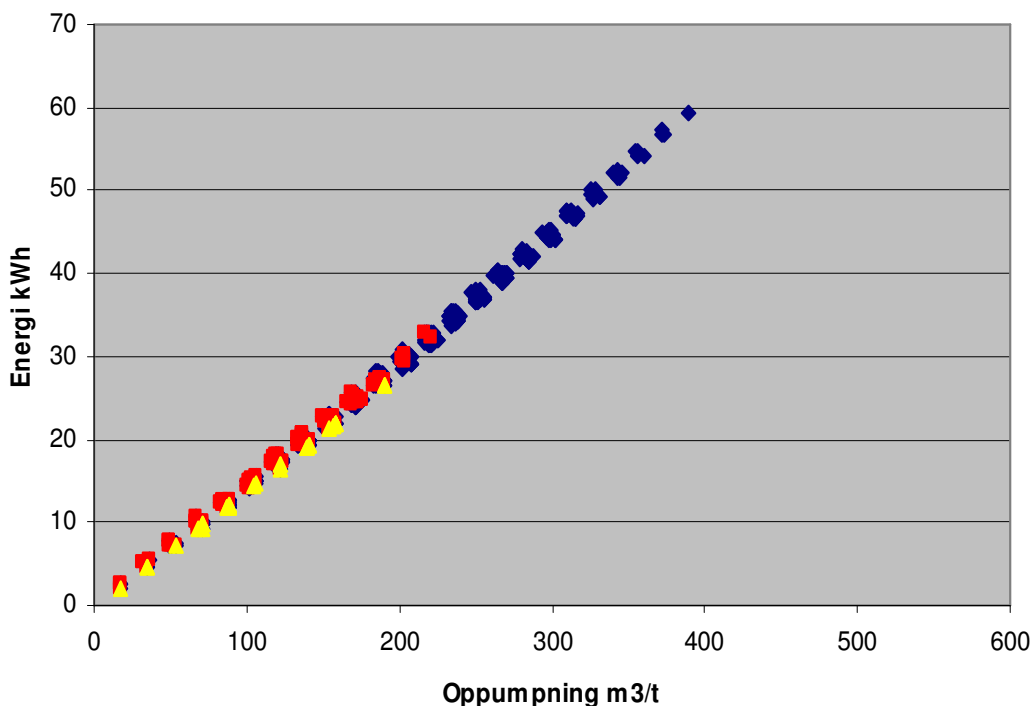
Ved at vælge de 30 mest energieffektive kombinationer med disse nye pumper, kan der opnås en yderligere besparelse, så den samlede besparelse beløber sig til 25%.



Figur 7.2 **Nye pumper, samme ydelse.** Energiforbruget ved forskellige pumpekombinationer som funktion af den oppumpede mængde. De blå markeringer angiver alle kombinationer, de røde markeringer angiver de reelt anvendte kombinationer og de gule markeringer angiver de 30 mest energieffektive kombinationer

Hvis der udskiftes til pumper med generelt mindre ydelser, som beskrevet i Scenarie II, kan besparelsen blive endnu højere. Figur 7.3 viser således, hvordan energiforbruget i forhold til indvindingsmængden fordeler sig i dette scenarie. Det er tydeligt, at der nu er endnu mindre variation mellem de forskellige pumpekombinationer, hvilket dels skyldes, at pumperne er fungeret tæt på deres optimale driftspunkt, dels at energikurven er fladere i de nye pumper. Der er klart, at der med mindre pumper skal indvindes fra de enkelte pumper i flere timer, og der skal ligeledes vurderes på forsyningssikkerheder, inden dette kan sættes i værk. En beregning viser, at med anvendelse af 2008 kombina-

tionerne, bliver besparelsen 24% på energiforbruget. En yderligere besparelse kan opnås ved optimering af driften til de 30 mest effektive kombinationer, hvorved den samlede besparelse beløber sig til 28%. Dette svarer til ca. 75.000 kWh om året.



Figur 7.3 **Nye pumper, mindre ydelse.** De blå markeringer angiver alle kombinationer, de røde markeringer angiver de reelt anvendte kombinationer og de gule markeringer angiver de 30 mest energieffektive kombinationer

Det er tidligere beskrevet, at der er et større enkelttab mellem boring 8 og boring 9. For at vurdere effekten af den energimæssige betydning af dette tab, er der kørt et scenarie, hvor enkelttabet er elimineret fra ledningsnettet. Det viser sig dog, at der kun er tale om et merforbrug på godt 1% grundet dette tab.

Tabel 7.1 opsummerer ovenstående resultater på en overskuelig måde.

Tabel 7.1 Målt og beregnede oppumpninger ved forskellige scenarier

Scenariestimulering	Oppumpning m <sup>3</sup>	Energiforbrug kWh	Specifikt energiforbrug kWh/m <sup>3</sup>	Besparelse % af nu- værende
Målt 2008	1.348.500	270.618	0.201	-
Beregning - nuværende situation	1.405.589	266.321	0.189	0
Beregning - nuværende pumper, optimale kombinationer (30 bedste)			0.175	7
Beregning - nye pumper, samme ydelse, alle kombinationer	1.383.380	211.805	0.153	19
Bedste 30			0.142	25
Beregning - nye pumper, mindre ydelse, alle kombinationer	832.414	119.917	0.144	24
Bedste 30			0.137	28
Beregning - eliminering af enkelttab	1.422.516	266.470	0.187	1

## 7.2 Andre scenarier

For at vurdere potentialet ved opskalering af resultaterne fra Birkerød området er der gennemregnet yderligere scenarier for at belyse effekten af ændrede rørdimensioner i råvandssystemet, ændrede hydrogeologiske forhold i grundvandsmagasinet og ændrede virkningsgrader i indvindingsboringerne. Scenarierne kan beskrives således:

- 1) Mindre rørdimension: alle rørdimensioner i råvandssystemet er reduceret med 15% i forhold til nuværende situation. Alle andre forhold er uændrede.
- 2) Mindre transmissivitet og virkningsgrad: transmissiviteten i kildepladsområdet er sænket med en dekade (fra ca.  $20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  til  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  i den højtransmissive del af kildefeltet og fra  $10^{-3}$  til  $10^{-4}$  i den lavtransmissive del af feltet) og ændring af virkningsgraden i kalkboringer til ca. 90% (undtagen i boring 7 og 8 som i forvejen har lave virkningsgrader).
- 3) Større rørdimension: alle rørdimensioner i råvandssystemet er forøget med 15% i forhold til nuværende situation. Alle andre forhold er uændrede.

- 4) Større transmissivitet og virkningsgrad: transmissiviteten i kildepladsområdet er hævet med en op til en halv dekade (fra ca.  $20 \cdot 10^{-3}$  til  $100 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  i den højtransmissive del af kildefeltet og fra  $10^{-3}$  til  $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  i den lavtransmissive del af feltet) og ændring af virkningsgraden i boring 7 og 8 til mere end 200%, hvilket svarer til de andre boringers virkningsgrad.

I analysen af resultaterne er der udelukkende fokuseret på den specifikke energi beregnet i de 4 tilfælde, da denne nøgleparameter er afgørende for opskaleringen af resultaterne til landsplan. Resultaterne er opsummeret i nedenstående Tabel 7.2.

Tabel 7.2 Resultaterne af beregning med ændrede rørdimensioner, transmissivitetsforhold og virkningsgrader

Scenariesimulering	Specifikt energiforbrug kWh/m <sup>3</sup>	Besparelse % af nuværende
Mindre rørdimension	0.196	-4%
Mindre transmissivitet og virkningsgrad	0.229	-21%
Større rørdimension	0.183	3
Større transmissivitet og virkningsgrad	0.178	6

Det er tydeligt, at effekten af at variere rørdimensioner inden for realistiske grænser ikke har den helt store effekt på energiforbruget. Derimod betyder det relativt meget, hvordan grundvandsmagasinet transmissivitetsforhold og boringernes virkningsgrader varierer. I tilfældet Birkerød Vandforsynings kildeplads har de fleste boringer ret høje virkningsgrader og grundvandsmagasinet er i forvejen højtydende. Dette giver sig bl.a. også udtryk i, at energiforbruget til indvinding er mindre end de fleste andre vandforsyningen, som indgår i DANVA's benchmarking.

### 7.3 Økonomiske betragtninger

For Birkerød Vandforsyning vil der kunne opnås en årlig energibesparelse på minimum 70.000 kWh, svarende til en mindre driftsudgift på 50-55.000 kr. ved en kWh-pris på 0,70-0,80 kr. Indkøb og skift af dykpumperne vil beløbe sig til ca. 240.000 kr. Der vil derfor være tale om en simpel tilbagebetalingstid på 4-5 år. Heri er ikke medregnet eventuelle scrap-indtægter for de gamle pumper. Som inspiration til de danske politikere skal nævnes at mange pumper, som udskiftes grundet energioptimering, eventuelt kan gøre gavn i lande, hvor investeringsmulighederne er ringe.

Som det fremgår af ovenstående opnås der ikke den samme energibesparelse ved skift af dykpumperne i hver af de i alt ni boringer. Energibesparelsen pr. investeret krone varierer betragteligt fra boring til boring. Ved at skifte de syv dykpumper, der giver størst besparelse pr. investeret krone, kan den simple tilbagebetalingstid reduceres yderligere til ca. 3 år. Der vil dog ikke opnås den samme samlede energibesparelse på denne måde.

## 8 OPSKALERING TIL LANDSPLAN

Til vurdering af opskaleringen er der udvalgt data fra 46 vandforsyninger fra 2008 benchmarkingen, idet der er set bort fra de største og de mindste forsyninger. Processen er detaljeret beskrevet i Bilag 5.

Figur 2.1 i Bilag 5 viser en optegning af det specifikke energiforbrug på de udvalgte vandforsyninger til indvinding og vandbehandling som funktion af den årlige indvinding. Der er tilsyneladende ikke nogen sammenhæng mellem vandforsyningens størrelse - målt i årlig indvundet vandmængde - og det specifikke energiforbrug til produktion. Gennemsnittet for de 46 vandforsyninger er 0,40 kWh/m<sup>3</sup>. Birkerød Vandforsynings specifikke energiforbrug på hører med sine 0,24 kWh/m<sup>3</sup> til den energimæssigt bedste tredjedel af vandforsyningerne. Den gennemsnitlige indvinding for disse er ca. 2,3 mio. m<sup>3</sup>/år.

Det skal bemærkes, at der er tale om energiforbruget til produktion, dvs. udover indvinding også forbrug til beluftning, filterskylning, mv. For Birkerød var elforbruget til "ren" indvinding, dvs. eksklusiv forbruget til behandling, på ca. 0,20 kWh/m<sup>3</sup> i 2008. De ovenfor omtalte 28% besparelse af energiforbruget ved udskiftning af pumper og optimering af indvindingsdriften svarer til en besparelse på 11% af det samlede energiforbrug på vandforsyningen, når vandbehandling og udpumpning medtages.

Det vurderes at være en konservativ antagelse, at alle danske almene vandforsyninger ud fra en gennemsnitlig betragtning kan opnå en tilsvarende energibesparelse som Birkerød ved at skifte sine pumper til nye med mindre ydelser og ved samtidig at optimere driften af indvindingen.

Med denne antagelse vil energibesparelsen på landsplan svare til 22 GWh/år i vandforsyningssektoren, og til en reduceret CO<sub>2</sub>-udledning på ca. 11.000 tons/år.

## 9 PERSPEKTIVERING

Der er gennemført et omfattende måleprogram for at fastlægge de styrende parametre på Birkerød Vandforsynings kildeplads og råvandsnet. Disse målinger er anvendt til at vurdere energibesparelspotentialet ved optimeret drift af kildepladsen - eventuelt inklusiv udskiftning af pumper, ændre rørdimensioner mv. i systemet.

Undersøgelserne og modelberegningerne viser, at potentialet for energibesparelser er på op til 28% af det nuværende energiforbrug på kildepladsen. Langt den største energibesparelse opnås ved at skifte til mere energieffektive dykpumper og samtidig at optimere driften ved ændring i indvindingsstrukturen.

Det vurderes, at resultaterne fra undersøgelserne af Birkerød Vandforsynings kildeplads kan opskaleres til landsplan. Opskaleringen til landsplan resulterer i en årlig energibesparelse på ca. 22 GWh, hvilket svarer til en reduktion på ca. 11% af vandforsyningssektorens samlede energiforbrug og en reduktion af den årlige udledning af CO<sub>2</sub> på ca. 11.000 tons. En investering i nye pumper vil kunne betales tilbage på 3-5 år, hvilket er en meget interessant horisont for vandforsyningen.

DANVA har vurderet energibesparelspotentialet på kildepladsen til at være 10-30%, og undersøgelsen viser således med 11%, at dette er opnåeligt, men dog i den absolut lave ende af det skønnede interval.

Det vurderes, at vandforsyningernes rentvandspumper i langt højere grad end råvands-pumperne allerede er energioptimeret og tilpasset de aktuelle vandforbrug. Derved vil det samlede besparelspotentiale i vandforsyningssektoren formentlig være mindre end 11%.

Vurderingen om energibesparelser på 25% i vandsektoren som helhed skal derfor opnås gennem besparelser **både** i vandforsyningssektoren **og** i spildevandssektoren, og der skal kunne opnås væsentlig større besparelser i spildevandssektoren.

## 10 **REFERENCER**

Graham, D.N., Butts, M.B., 2006. Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE, *Watershed Models* (Eds. V.P. Singh and D.K. Frevert), Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, 245-272.

Gregersen, J.B., Gijsbers, P.J.A., Westen, S.J.P., 2007. OpenMI : Open Modelling Interface, *J. Hydroinformatics*, 9 (3), 175-191.

Halford, K.J., Hanson, R.T., 2002. User Guide for the Drawdown-Limited, Multi-Node Well (MNW) Package for the U.S. Geological Survey's Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, Versions MODFLOW-96 and MODFLOW-2000t, U.S. Geological Survey, Open-File Report 02-293, 33 p.

Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular groundwater model — the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Madsen, H., Falk, A.K., Rosbjerg, D., Madsen, H., Schrøder, N., Mortensen, J., Mortensen, B., Kristensen, B. and Brandt, G., 2007. Real-time optimisation of groundwater management, ModelCARE 2007, Sixth International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Credibility in Modelling, 9-13 September 2007, Copenhagen, Denmark, Proceedings, Vol. 1, 206-210.

Madsen, H., Gudbjerg, J., Falk, A.K., 2008. A combined groundwater and pipe network model for well-field management. MODFLOW and More: Ground Water and Public Policy, Golden, Colorado, USA, May 19-21, 2008.

Nielsen, K.A., 2007. Fractured aquifers. Formation Evaluation by Well Testing. Trafford publishing, Victoria, BC, Canada.

Rossman, L.A., 2000. EPANET 2, Users Manual, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.

Schlumberger Water Services, 2007. Aquifer Test Pro 4.2. User's manual.