

## Bilag 10

### Beregning af grundvandssænkning

Beregninger er udført med udgangspunkt (Nielsen et al. 2000)

#### Randbetingelser og variable

Grundvandsmagasinet har uendelig horisontal udstrækning og befinder sig i dybden  $0 < z < H$ , hvor  $H$  er den vandmættede dybde inden gravningen starter.

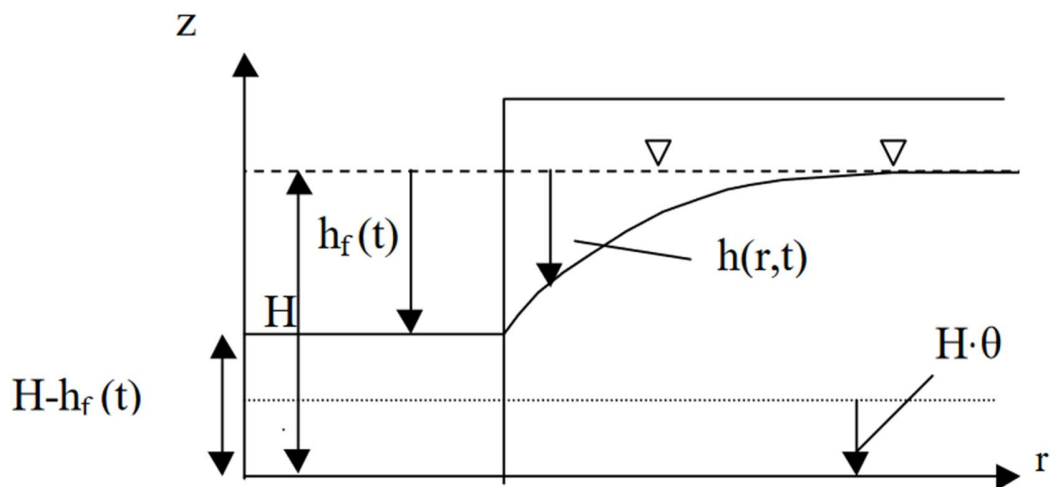
Den hydrauliske ledningsevne betegnes  $K_h$ . Den effektive porøsitet er  $\theta$ , hvor  $0 < \theta < 1$ , som giver diffusiviteten

$$D = \frac{K_h \cdot H}{\theta}$$

Gravningen starter til tiden  $t = 0$  og foregår på en sådan måde, at der graves en konstant råstofmængde pr. tidsenhed, og der graves over hele højden  $H$ . Arealet af søen i graven vil derfor vokse lineært med tiden og radius af søen  $r_f(t)$ . Sænkningen af søens vandspejl  $h_f(t)$  er lig med sænkningen  $h(r_f(t), t)$  i grundvandsmagasinet ved skillefladen.

Der ses bort fra: 1. den vandmængde, der fjernes fra søen sammen med det opgravede materiale. 2. Afdampning fra søens overflade. 3. Tilførsel af vand til systemet fra nedbør o.a.

Det forudsættes at: 1. Råstofgraven er cirkulær, som er en god tilnærmelse til en nogenlunde kvadratisk udgravning. 2. Udgravningen foregår med konstant intensitet. Dvs. der ses bort fra aktivitetsophold om natten og eventuelle længere perioder uden udgravning.



Figur 1: Skematisk illustration af grundvandssænkingsmodellen (Nielsen et al. 2000).

## Model

Grundvandssænkningen  $h(r, t)$  er givet ved:

$$h(r, t) = H \cdot (1 - \theta) \cdot \frac{E_{1_{mod}}(\eta_1)}{\theta + (1 - \theta) \cdot E_{1_{mod}}(\eta_1)} \cdot \frac{E_1(r^2/4Dt)}{E_1(\eta_1)}, \text{ givet at } r \geq r_f(t)$$

Ligning 1

Hvor den dimensionsløse parameter  $\eta_1$  fås ved:

$$\begin{aligned} r_f(t) &= \sqrt{\frac{dV_{ex}}{\pi H} t} \\ &= \sqrt{\eta_1 \cdot 4Dt} \quad \text{Ligning 2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \eta_1 &= \frac{dV_{ex}}{4\pi HD} \\ \eta_1 &= \frac{r_f^2(t)}{4Dt} \end{aligned}$$

$E_1$  og  $E_{i_{mod}}$  angiver henholdsvis det exponentielle integral og et modificeret exponentielt integral:

$$\begin{aligned} E_1(s_0) &= \int_{s_0}^{\infty} \frac{e^{-s}}{s} ds, \text{ givet at } s_0 > 0 \\ E_{i_{mod}}(\eta_1) &= \eta_1 \cdot e^{\eta_1} \cdot E_1(\eta_1) \end{aligned}$$

Sænkningen i råstofsøen fås ved at indsætte ligning 2 i ligning 1:

$$\begin{aligned}
 h(r_f, t) &= H \cdot (1 - \theta) \cdot \frac{E_{1_{mod}}(\eta_1)}{\theta + (1 - \theta) \cdot E_{1_{mod}}(\eta_1)} \cdot \frac{E_1(\eta_1 \cdot 4Dt/4Dt)}{E_1(\eta_1)} \\
 &= H \cdot (1 - \theta) \cdot \frac{E_{1_{mod}}(\eta_1)}{\theta + (1 - \theta) \cdot E_{1_{mod}}(\eta_1)}
 \end{aligned}
 \tag{Ligning 3}$$

Her ses at tiden udgår af ligningen og  $h(r_f, t)$  kan forsimples til  $h_f$ . Derefter kan ligning 1 forsimples med substitution af ligning 3:

$$\begin{aligned}
 h(r, t) &= h_f \cdot \frac{E_1(r^2/4Dt)}{E_1(\eta_1)} \\
 &= \frac{h_f}{E_1(\eta_1)} \cdot E_1(r^2/4Dt)
 \end{aligned}
 \tag{Ligning 4}$$

## Modelparametre

Egenskaberne for det omkringliggende vandbærende lag er givet ved:

$$\begin{aligned}
 H &= 6m \\
 \theta &= 0.25 \\
 K_h &= 6.4 \cdot 10^{-4} m/s
 \end{aligned}$$

Modellen er beregnet for to scenarier, lav og høj udgravningsrate:

$$\begin{aligned}
 dV_{min} &= 50.000 m^3/\text{år} \\
 dV_{max} &= 75.000 m^3/\text{år}
 \end{aligned}$$

## Udregning

Ved udgravning giver dette ved beregning af ligning 3 en sænkning i søen på:

$$\begin{aligned}
 h_{f_{min}} &= 0,1449m, \quad dV_{ex} = 50.000 m^3/\text{år} \\
 h_{f_{max}} &= 0,2009m, \quad dV_{ex} = 75.000 m^3/\text{år}
 \end{aligned}$$

Ved indsætning i ligning 4 fås for nu  $dV_{ex} = 50.000 m^3/\text{år}$ :

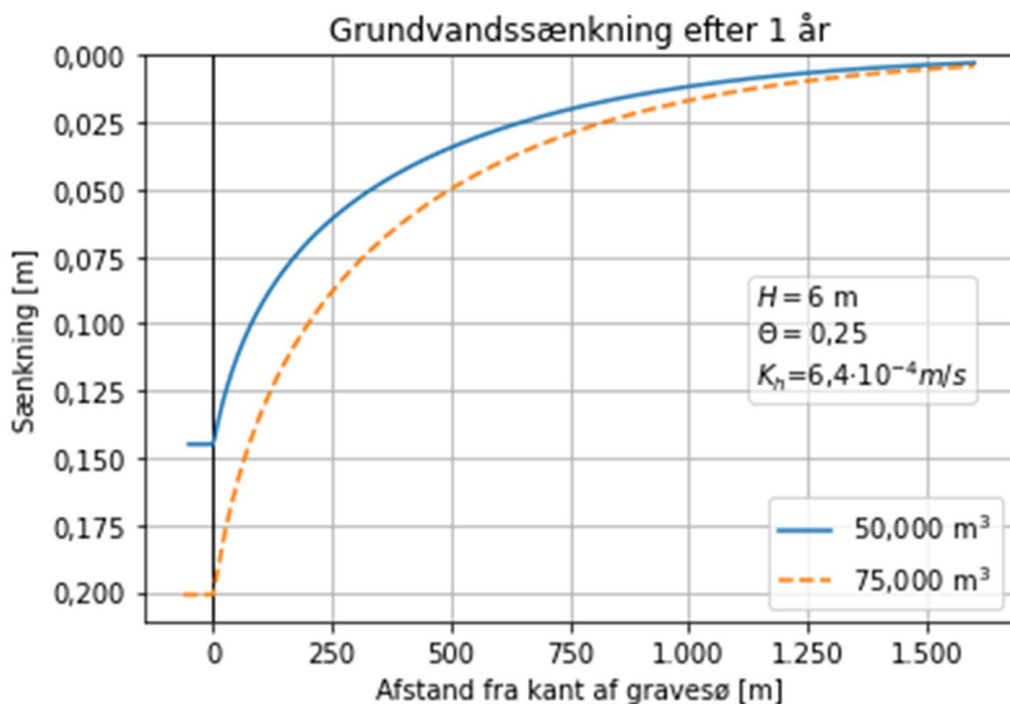
$$E_1(\eta_1) = 6,0178 \quad \Rightarrow \quad h(r, t) = 0.02408m \cdot E_1(r^2/4Dt)$$

og for  $dV_{ex} = 75.000 m^3/\text{år}$ :

$$E_1(\eta_1) = 5.6130 \quad \Rightarrow \quad h(r, t) = 0.03580m \cdot E_1(r^2/4Dt)$$

Tabel 1: Grundvandssænkning i og udenfor råstofgrav ved 50.000 m<sup>3</sup>/år og 75.000 m<sup>3</sup>/år efter et års udgravning.

Afstand [m]	$h_{min}$ [m]	$h_{max}$ [m]
0	0,145	0,201
200	0,069	0,100
400	0,043	0,062
600	0,028	0,040
800	0,018	0,026
1000	0,012	0,017
1200	0,007	0,011
1400	0,005	0,007
1600	0,003	0,004

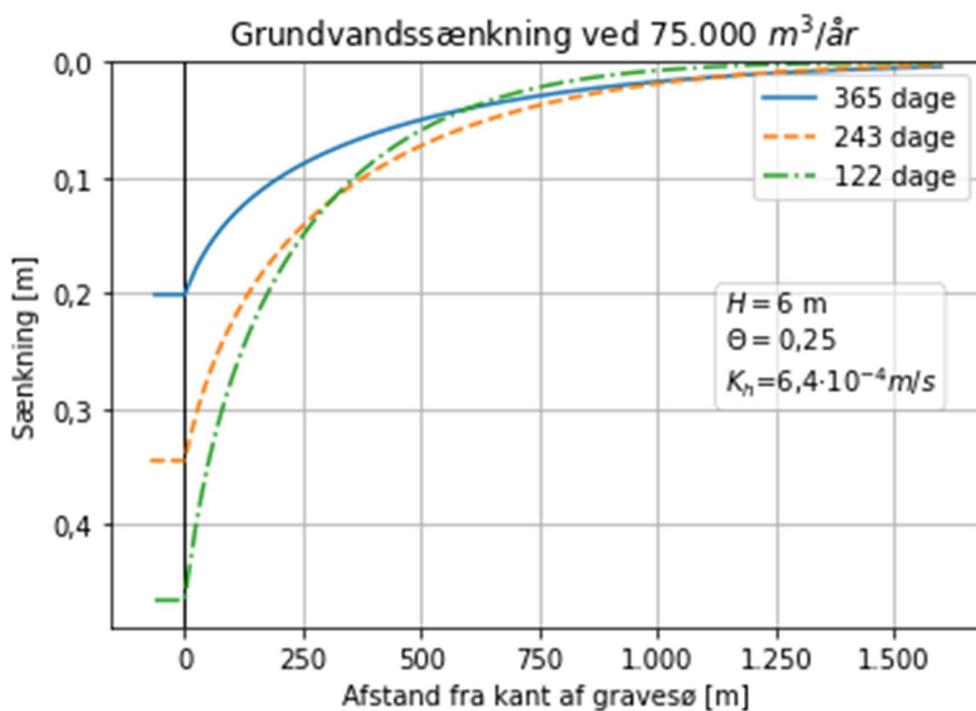


Figur 2: Grundvandssænkning i og omkring råstofgrav efter 1 års udgravning.

## Påvirkning af graveintensitet

Den beregnede grundvandssænkning efter et år kan ses i tabel 1 og figur 2. Det er værd at bemærke, at ligevægtsvandstanden i gravesøen er uafhængig af den tid der graves. Derfor er den for et givent område, alt andet lige, udelukkende afhængig af den gennemsnitlige graveintensitet. For eksempel kan udgravningen af samlet set  $75.000 \text{ m}^3/\text{år}$  resultere i forskellig grundvandssænkning alt efter om den samlede mængde materiale, der bliver fjernet i en kortere periode, f.eks. hvis graven ikke er i drift om vinteren.

Eksempler på dette er vist i figur 3.



Figur 3: Grundvandssænkning i omkring råstofgrav ved varierende graveintensitet.

## Kildehenvisninger

Nielsen, Kurt Ambo, Gunnar Gustafson, and Johan Claesson. 2000. *Følgevirkninger Af Råstofgravning under Grundvandsspejlet*. Vol. 526. Miljøprojekt. Miljøstyrelsen.