

UNICEF-bygningen på Nordhavn



Miljøundersøgelse af ATES-anlæg

Bilag 3 - Modelberegning

Udarbejdet af:

Søren Erbs Poulsen, Ph.d., hydrogeolog

Kontrol:

Stig Niemi Sørensen

Dato:

30.03.2026

Indholdsfortegnelse

1. Kort sammenfatning.....	3
2. Formål.....	4
3. Modelberegninger.....	4
3.1. Modelopsætning og -forudsætninger	5
3.2. Hydrauliske forhold under drift.....	8
3.2.1 Påvirkning af HOFORs boringer	9
3.3. Temperaturforhold under drift	10
4. Konklusion.....	11
5. Referencer	12

1. Kort sammenfatning

I forbindelse med planlægning af et ATES-anlæg til UNICEF-bygningen i Nordhavn er der gennemført numeriske modelberegninger for at vurdere den hydrauliske og termiske påvirkning af kalkgrundvandsmagasinet samt den potentielle påvirkning af HOFORs eksisterende ATES-anlæg i området.

Modelresultaterne viser, at driften af UNICEF-anlægget kun medfører små hydrauliske påvirkninger af HOFORs borer. De beregnede ændringer i trykniveauet er sæsonmæssige og begrænset til op til ca. 10 cm i HOFORs injektionsboringer og mellem ca. -7,5 og 7 cm i produktionsboringerne. Sammenlignet med de absolutte trykniveauvariationer ved drift af HOFORs anlæg, som er i størrelsesordenen 4-5 m, udgør påvirkningen fra UNICEF-anlægget kun ca. 1-2 %. Der opstår ingen permanent ændring i trykniveauet, da den samlede vandbalance i systemet er nul.

De termiske beregninger viser, at temperaturpåvirkningen fra UNICEF-anlægget primært er begrænset til området omkring UNICEF-anlæggets egne borer. Efter 30 års drift når temperaturfanerne ikke frem til HOFORs produktionsboringer, som ligger ca. 475 m fra UNICEF-anlægget og fortsat befinder sig i områder med temperaturer tæt på den naturlige grundvandstemperatur.

Samlet viser modelberegningerne, at etablering og drift af ATES-anlægget ved UNICEF-bygningen kun medfører lokale og begrænsede påvirkninger af grundvandsmagasinet og ikke forventes at påvirke driften af HOFORs ATES-anlæg.

2. Formål

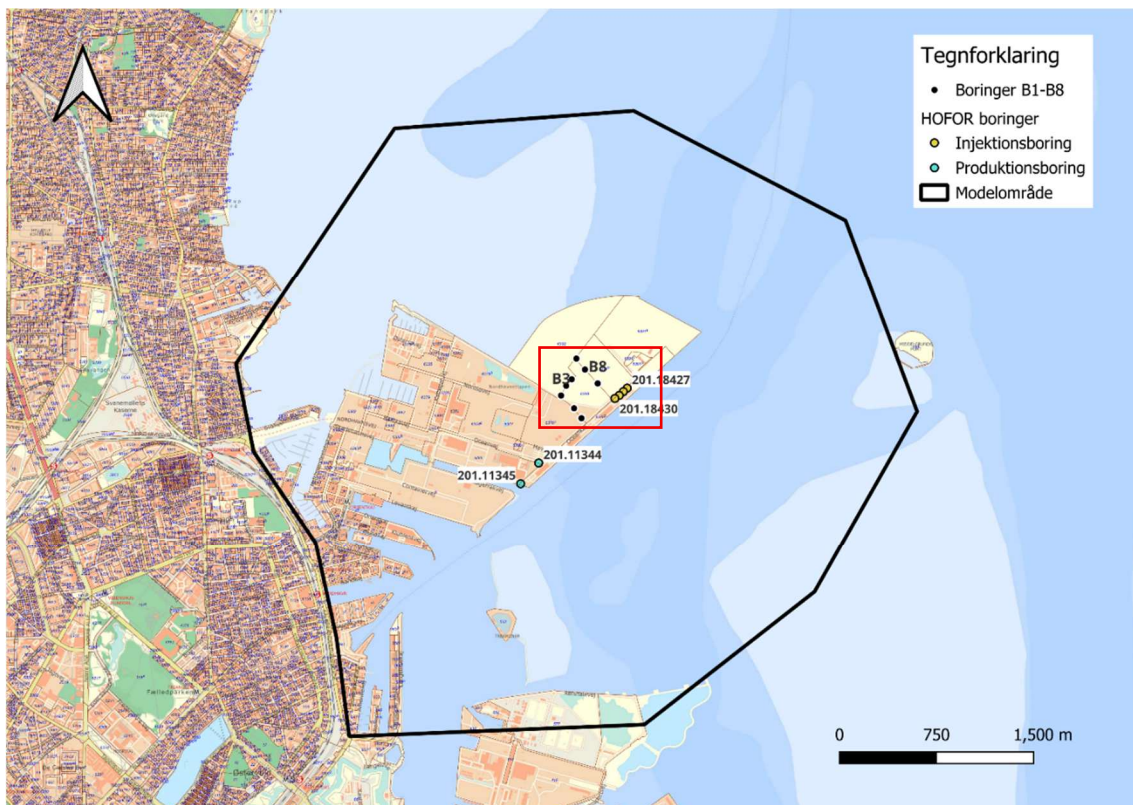
Denne rapport har til formål at belyse to væsentlige spørgsmål i forbindelse med vurdering af mulighederne for at etablere et ATES-anlæg til varme- og køleforsyning af en ny UNICEF-bygning på Nordhavn i København under hensyntagen til HOFORs eksisterende ATES-anlæg. Disse spørgsmål er følgende:

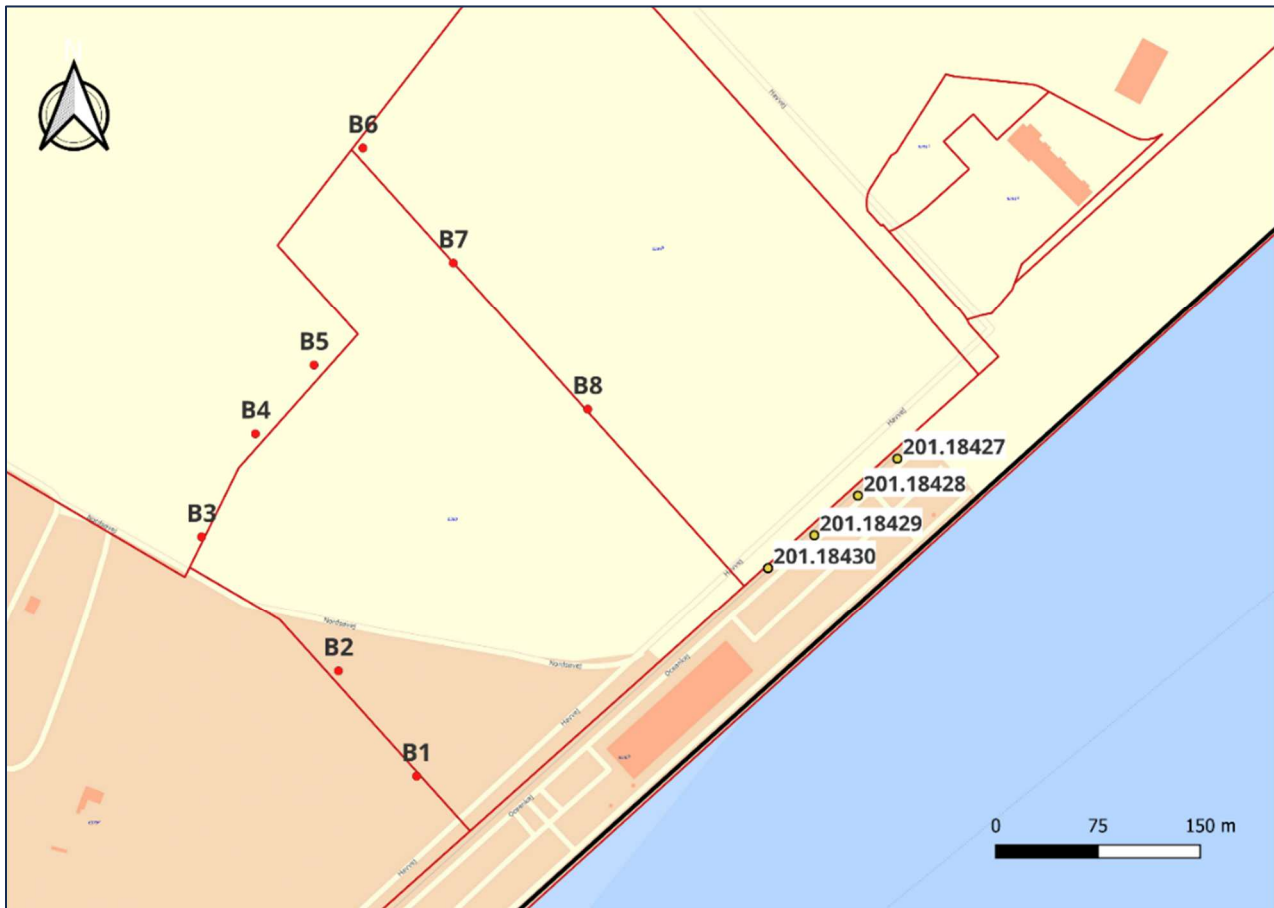
- 1) Er den hydrauliske påvirkning af HOFORs borerer væsentlig ved etablering af et ATES-anlæg til varme- og køleforsyning af den tiltænkte UNICEF-bygning?
- 2) Er der termisk gennemslag i HOFORs produktionsboringer, der potentielt forringer HOFORs muligheder for energiproduktion med deres ATES-anlæg?

3. Modelberegninger

Til simulering af den hydrauliske og termiske påvirkning af kalkgrundvandsmagasinet ved den tiltænkte UNICEF-bygning på Nordhavnen, som følge af varmelagring og varmeindvinding, er der opsat en horisontal 2-dimensionel hydraulisk og termisk model. Modellen er opstillet i FEFLOW, der simulerer variationerne i trykniveauet samt temperaturerne i den dybere Bryozokalk, omkring de planlagte borerer under driftsbetingelser (DHI Group, 2023). Alle borerer er filtersat i Bryozokalken, som i området vurderes at være hydraulisk afkoblet fra de overliggende kalk- og kvartære lag. Denne antagelse er i overensstemmelse med nærliggende model- og testresultater, som viser meget begrænset hydraulisk kontakt mellem Bryozokalken og Øvre Københavnerkalk (COWI, 2023).

Ved drift af ATES vil den mængde grundvand, som indvindes, ledes retur til samme grundvandsmagasin, dvs. at grundvandsmassebalancen ikke påvirkes ved ATES-drift, da der ikke forbruges noget grundvand.





Figur 1. Modelområde, simulerede ATES-boringer (rød) og Hofors injektionsboringer ved UNICEF-bygningens tiltænkte beliggenhed. Det røde rektangel i øverste underfigur angiver det viste område i den nederste underfigur. Baggrundskortet indeholder data fra GEUS samt Kortforsyningen.

Input til modellen og opsætning er baseret på feltundersøgelser og litteraturværdier. Placering af de simulerede ATES-boringer (B1-B8) er indikeret i Figur 1. De varme boringer er B1, B3, B5 og B7, hvorfra der indvindes varmt grundvand til varmeproduktion. Det afkølede vand returneres herefter til kalkmagasinet. De kolde boringer er B2, B4, B6 og B8, hvorfra der indvindes koldt grundvand som anvendes til køling. Det opvarmede vand returneres til kalkmagasinet. Det simulerede modelområde i FEFLOW er optegnet på Figur 1.

3.1. Modelopsætning og -forudsætninger

Af prøveboringer og boringsdata fra GEUS' Jupiter-database for UNICEF-grunden i Nordhavn (DGU nr. 201.20337 og 201.20374) fremgår det, at den geologiske lagfølge viser fyld (grus/sand/sten) i de øverste meter, efterfulgt af kalk (hvid, flintring) ned til boringernes bund i ca. 122 m u.t.

Magasinet modelleres som spændt, homogent og isotropt, og grundvandsstrømningen i Bryozokalken antages primært at foregå horisontalt. Denne antagelse understøttes af resultater fra prøvepumpinger i området, hvor påvirkningen af overliggende kalklag kun i meget begrænset omfang kan registreres (COWI, 2023).

Tabel 1. Geologisk profil

Geologi	Top kote [m.o.DNN]	Bund kote [m.o.DNN]	Porøsitet [%]	Reference
Fyld (sand, grus, sten)	2,5	-10	20-30	Freeze and Cherry (1979)
Kalk (øvre)	-10	-45	30	Kidmose (2022)
Kalk (ATES-magasinet)	-45	-120	30	Kidmose (2022)

Porøsiteten af de geologiske lag er ukendt, og de anvendte værdier er derfor baseret på litteraturværdier. Desuden forventes det at porøsiteten for kalk i Østsjælland ligger mellem 10 og 40%. Derfor er der til den endelige model anvendt en porøsitet på 30%.

Modellen simulerer både vinterdrift (varmeproduktion) og sommerdrift (køleproduktion) gennem en periode på 30 år (10965 dage), så der er simuleret både 30 vinter- og sommerdriftsperioder. Længden af vinter- og sommerdriftsperioder er angivet i Tabel 2, som viser driften for en periode på et år, der derfor køres i cyklus når simuleringstiden varer længere end et år.

Ved simulering af vinterdrift cirkuleres der en større grundvandsmængde (ca. $23,3 \cdot 10^4 \text{ m}^3$), end ved sommerdrift (ca. $8,4 \cdot 10^4 \text{ m}^3$), da det forventes at der skal produceres en større varme- end kølemængde til bygningen. Bygningens varme- og kølebehov er estimeret til henholdsvis 2650 og 1500 MWh/år. Der indvindes og injiceres henholdsvis 1987,5 og 1615 MWh/år fra og til grundvandsmagasinet givet de angivne virkningsgrader for varmepumpen (By & Havn, 2025). Den afledte kølevarme er summen af kølebehovet (1500 MWh/år) og varmeudvikling i varmepumpens kompressor og cirkulationspumpe ved køle drift (115 MWh/år).

Tabel 2. Månedlig fordeling af volumenstrømmen (m^3/d) og injektionstemperatur ($^{\circ}\text{C}$) ved henholdsvis varme og køleproduktion for alle 4 boringspar. Negative pumperater indikerer injektion.

Måned	Varme boringer (B1, B3, B5, B7)		Kolde boringer (B2, B4, B6, B8)		HOFORs boringer (produktion og injektion)	
	Pumperate per boring [m^3/d]	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Pumperate per boring [m^3/d]	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Pumperate total [m^3/d]	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
Januar	360	-	-360	4	± 1636	5
Februar	320	-	-320	4	± 1612	5
Marts	313	-	-313	4	± 1425	5
April	240	-	-240	4	± 1130	5
Maj	34	-	-34	4	± 633	5
Juni	-282	25	282	-	± 258	5
Juli	-328	25	328	-	± 141	5
August	-224	25	224	-	± 158	5
September	-45	18	45	-	± 367	5
Oktober	168	-	-168	4	± 763	5
November	264	-	-264	4	± 1243	5
December	336	-	-336	4	± 1530	5

De beregnede månedlige pumperater for boringerne B1-B8 i Tabel 2 sikrer, at den samlede årlige energiudveksling med grundvandsmagasinet, svarer til det faktiske netto varmeudtræk. Dette er afgørende for en retvisende vurdering af anlæggets samlede miljøpåvirkning.

Det årlige varmeforbrug er delt ud på de respektive måneder ved anvendelse af graddage i et dansk normalår (DMI, 2026). Ved anvendelse af temperaturforskellen mellem produktions- og

injektionsvandet beregnes da den gennemsnitlige volumenstrømning i hver måned. For HOFORs borerer anvendes den maksimale tilladte indvinding på 330.000 m³/år. HOFORs vandmængder er ligeledes fordelt ud ved anvendelse af graddage. I modellen er HOFORs borerer således repræsenteret ved de maksimalt tilladte indvindingsmængder selvom den faktiske indvinding er væsentligt lavere. De beregnede temperaturpåvirkninger repræsenterer derfor en konservativ vurdering af den potentielle interferens mellem de to anlæg.

I den hydrauliske analyse simuleres indledningsvis driften af UNICEF-anlægget uden aktive HOFOR-borerer. HOFORs borerer indgår derfor ikke som aktive pumpekilder i modellen, men anvendes udelukkende som observationspunkter til vurdering af den hydrauliske påvirkning. For at vurdere om påvirkningen er betydelig, simuleres den simultane drift af begge anlæg således at de absolutte variationer i trykniveauet kan sammenlignes med de ændringer, der kan tilskrives driften af UNICEF-anlægget. I den termiske analyse indgår begge anlæg ligeledes i modelberegningerne.

Under vinterdrift antages det, at der lagres koldt vand på 4°C i de kolde borerer. Under sommerdrift antages det at der lagres varmt vand på 18°C og 25°C i de varme borerer ved anvendelse af henholdsvis frikøling og aktiv køling. Det er antaget at den naturlige grundvandstemperatur i området ved UNICEF-bygningen er 10,3°C (COWI, 2023).

Det antages, at porerum, revner og sprækker i kalken er homogent fordelt i kalkmagasinet, så der ikke er lateral eller vertikal variation i de hydrauliske og termiske parametre. Modellen skal simulere et dynamisk system, da den termiske energibalance indenfor modelområdet ændres gennem simuleringsperioden.

Den numeriske model er opstillet som en horisontal 2-dimensionel model, hvor vertikale strømninger ikke eksplicit simuleres. Ved vurderingen af påvirkningen af HOFORs borerer vurderes en horisontal 2D-beskrivelse af strømningsfeltet at være rimelig. Selvom der kan forekomme lokale vertikale gradienter i umiddelbar nærhed af ATES-borererne, aftager disse med afstanden fra borererne. Den nærmeste HOFOR-boring er beliggende ca. 175 m fra UNICEF-anlæggets boring B8, mens top af filterintervallet ligger ca. 45 m under terræn. I denne afstand vurderes de lokale vertikale gradienter i væsentlig grad at være udjævnet, således at påvirkningen af HOFORs borerer overvejende kan beskrives ved horisontal strømning i kalkmagasinet. Infiltration til Bryozokalken fra jordoverfladen medtages ikke i modellen pga. den ringe hydrauliske forbindelse til de overfladenære jordlag.

Der anvendes et stationært trykniveau på 0 m langs modelranden (Figur 1) tilsvarende COWIs model for HOFORs anlæg (COWI, 2023).

ATES-borererne simuleres som hydrauliske punktkilder, hvor pumperaterne og injektionstemperaturerne varierer i tid.

Tabel 3. Indvindingsdybde og boringsradius for de simulerede borerer.

Boringsdata	B1-B8	Reference
Boringsradius [m]	0,2	Sørensen (2026)
Indvindingsdybde top [m.o.DNN]	-45	Sørensen (2026)
Indvindingsdybde bund [m.o.DNN]	-122	Sørensen (2026)

De anvendte hydrauliske og termiske egenskaber, som er baseret på litteraturværdier og feltundersøgelser, er listet i Tabel 4 og Tabel 5.

Tabel 4. Hydrauliske egenskaber

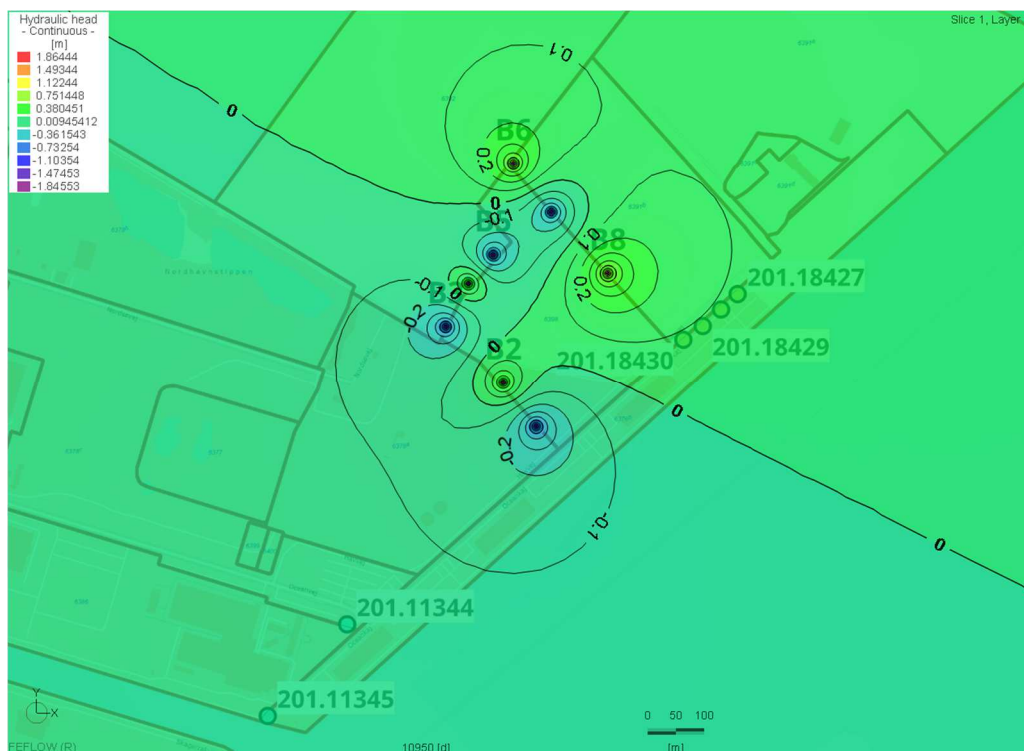
Hydrauliske egenskaber	Kalk	Reference
Transmissivitet [m^2/s]	$3 \cdot 10^{-3}$	Sørensen (2026)
Specifik lagring [m^{-1}]	10^{-4}	Sørensen (2026)

Tabel 5. Termiske egenskaber

Termiske egenskaber	Kalk	Vand	Reference
Volumetrisk varmekapacitet [$MJ/m^3/K$]	2,2	4,2	Clauser (2020)
Varmeledningsevne [$W/m/K$]	2,0	0,65	Balling et al. (1981)
Anisotropi af varmeledningsevne [-]	1	-	Freeze and Cherry (1979)
Langsgående dispersivitet (termisk) [m]	5	-	Gelhar et al. (1992)
Transvers dispersivitet (termisk) [m]	0,5	-	Gelhar et al. (1992)
Vertikal udstrækning af varmeudbredelse (m)	77	-	Sørensen (2026)

3.2. Hydrauliske forhold under drift

Den hydrauliske analyse omfatter alene påvirkningen fra UNICEF-anlæggets boringer, mens HOFORs boringer ikke indgår eksplicit i simuleringen. Formålet er at isolere den ændring i trykniveauet, som UNICEF-anlægget medfører i HOFORs boringer. Da grundvandsstrømning i et porøst magasin under de givne forudsætninger kan betragtes som et lineært system, gælder superpositionsprincippet for hydrauliske påvirkninger. Det betyder, at den samlede påvirkning fra flere anlæg kan opnås ved at summere bidragene fra de enkelte anlæg, og at det derfor er metodisk korrekt at beregne påvirkningen fra UNICEF-anlægget isoleret. De beregnede ændringer i trykniveauet omkring ATES-boringerne efter 30 års drift er illustreret i Figur 2.



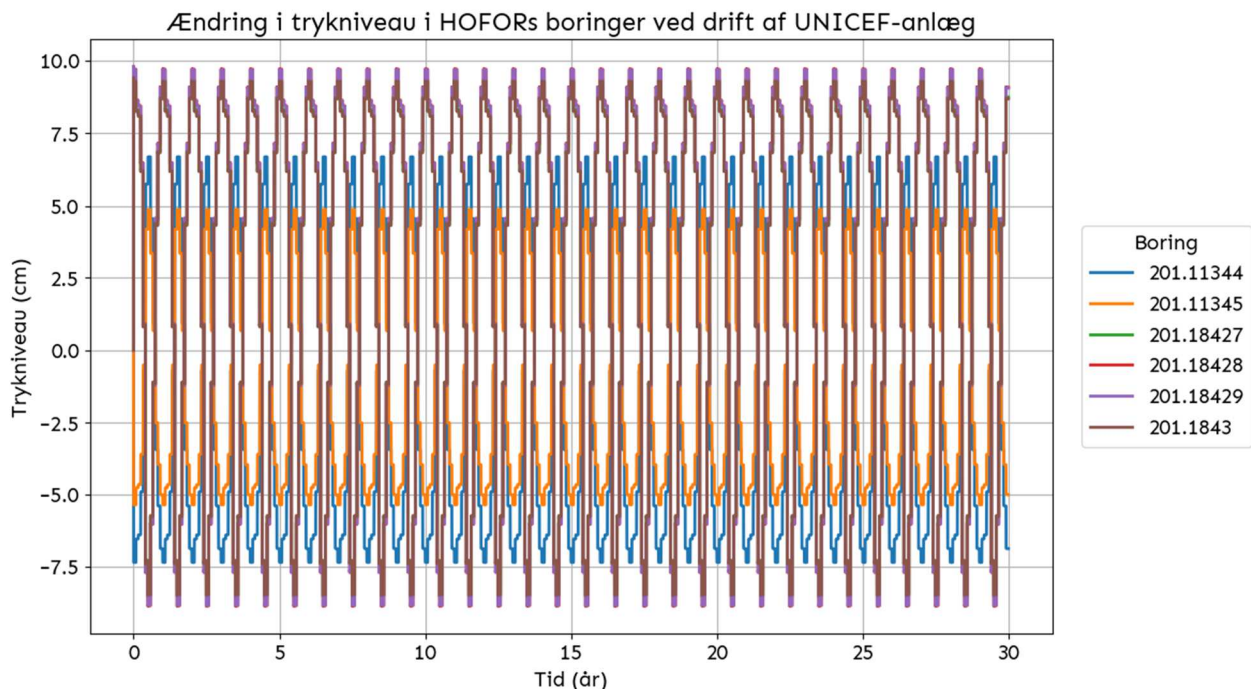
Figur 2. Beregnede ændringer i trykniveauet efter 30 års drift udelukkende af UNICEF-anlægget. Konturlinjerne er tegnet med 0,1 m ækvidistance.

Simulationerne viser, at ændringerne i trykniveauet i HOFORs injektionsboringer generelt ligger under 10 cm, størst i injektionsboringerne. Da vandbalancen i systemet er nul, opstår der ingen langsigtet regional sænkning eller hævnning af trykniveauet.

Samlet indikerer simuleringerne, at ATES-anlæggets hydrauliske påvirkning af grundvandsmagasinet er begrænset, lokal og stabil over tid.

3.2.1 Påvirkning af HOFORs boringer

Figur 3 viser den beregnede ændring i trykniveauet i de seks HOFOR boringer over en simuleret driftsperiode på 30 år som følge af driften af UNICEFs ATES-anlæg. Fire af boringerne (DGU nr. 201.18427, 201.18428, 201.18429 og 201.1843) er injektionsboringer i HOFORs anlæg, mens to boringer (DGU nr. 201.11344 og 201.11345) er produktionsboringer.



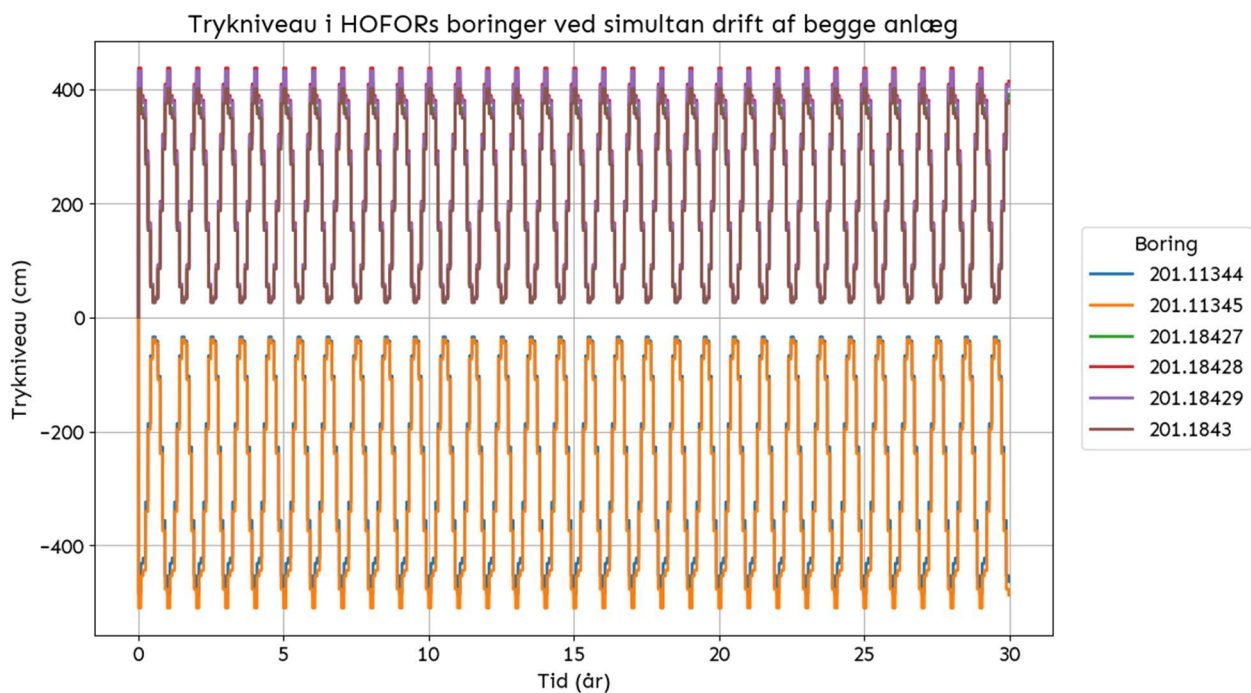
Figur 3. Beregnede ændringer i trykniveauet i centimeter i de seks HOFOR-boringer som funktion af tid over en simuleret driftsperiode på 30 år som følge af driften af UNICEFs ATES-anlæg.

Simulationen viser, at de største udsving forekommer i HOFORs injektionsboringer. Her ses sæsonmæssige variationer i trykniveauet, hvor vandstanden stiger under perioder med nettoinjektion og falder under perioder med nettooppumpning i ATES-anlægget. De maksimale beregnede vandstandsstigninger ligger i størrelsesordenen op til ca. 10 cm, mens der er midlertidige fald til -9 cm under oppumpning. I HOFORs produktionsboringer varierer påvirkningen af trykniveauet mellem -7,5 og 7 cm. Variationerne gentager sig årligt gennem hele den simulerede periode og afspejler de sæsonmæssige driftscykluser i anlægget. Simuleringen viser ydermere at variationerne fra UNICEFs ATES-anlæg i praksis ikke forplanter sig til HOFORs indvindingsboringer.

Simulationen viser desuden, at variationerne i alle boringer er stabile gennem hele den 30-årige simuleringsperiode, og der observeres ingen gradvis opbygning af en permanent vandstandsstigning eller -sænkning. De beregnede ændringer repræsenterer derfor alene små, periodiske variationer i trykniveauet.

Samlet viser resultaterne, at påvirkningen af HOFORs borer er begrænset til maksimalt 10 centimeter i injektionsboringerne og -7,5 cm i produktionsboringerne.

For at vurdere, om de beregnede ændringer i trykniveauet har reel betydning for HOFORs drift, er det nødvendigt at simulere den samtidige drift af de to anlæg og sammenligne de absolutte variationer i trykniveauet ved HOFORs borer med de ændringer, der kan tilskrives UNICEF-anlægget, og som er vist i Figur 3. Figur 4 viser variationerne i trykniveauet ved samtidig drift af begge anlæg, evalueret i observationspunkter placeret i umiddelbar nærhed af HOFORs borer (mindst to modelementer fra boringsnoden og ca. i filterradius = 0,2 m, af hensyn til numerisk pålidelighed).



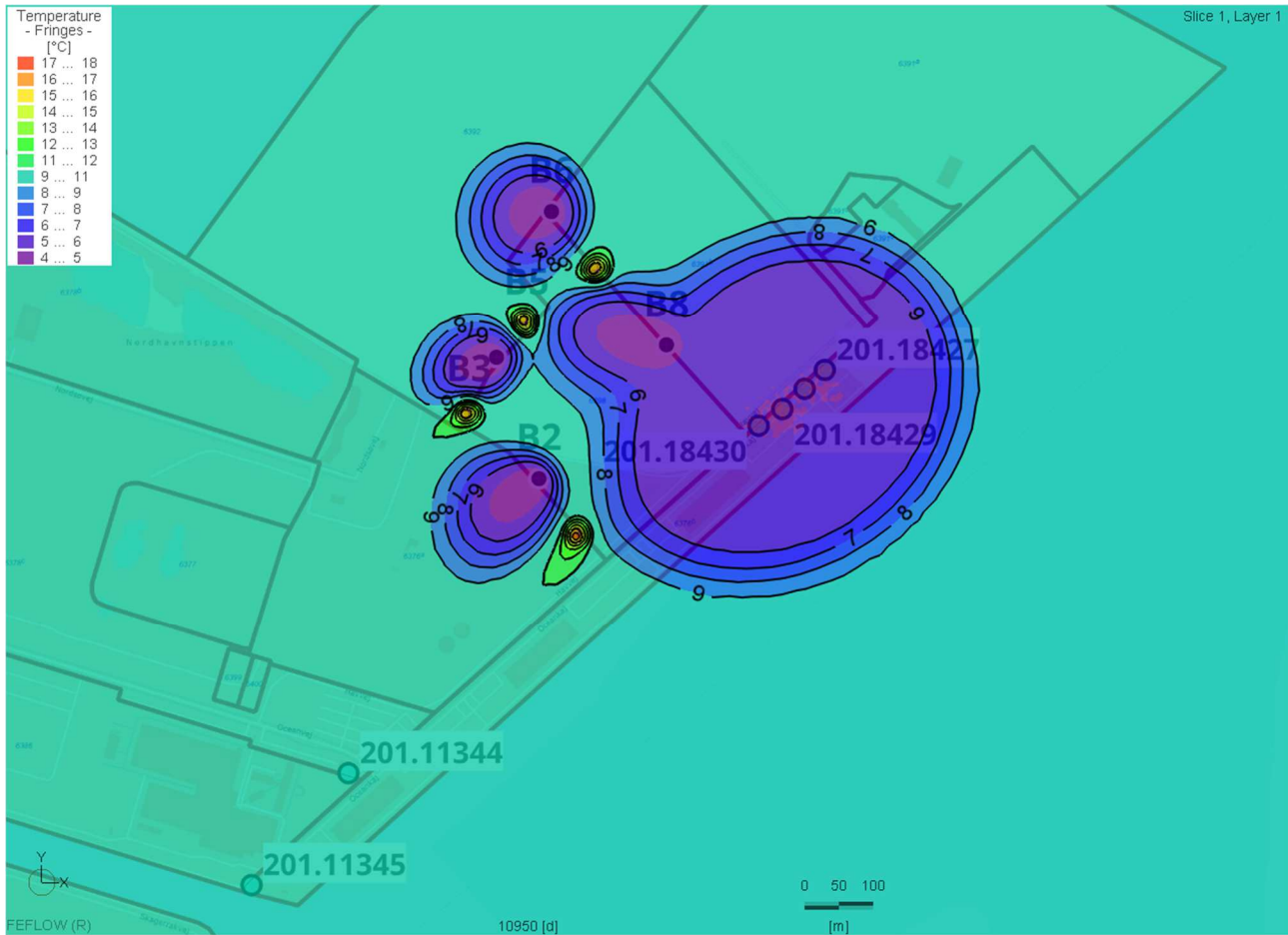
Figur 4. Beregnede trykniveauer umiddelbart udenfor filteret i HOFORs borer ved simultan drift af begge anlæg.

De samlede sænkninger i trykniveauet ved HOFORs produktionsboringer er her ca. 5,1 m. Til sammenligning er faldet i trykniveau som følge af UNICEF-anlægget ca. 7,5 cm, hvilket svarer til ca. 1,5 % af den samlede sænkning. For HOFORs injektionsboringer er den maksimale stigning i trykniveauet ca. 4,4 m, hvoraf ca. 10 cm kan tilskrives driften af UNICEF-anlægget. Dette svarer til ca. 2,3 % af den samlede stigning. Resultaterne viser således, at idriftsættelsen af UNICEF-anlægget kun medfører en meget begrænset hydraulisk påvirkning af HOFORs borer.

3.3. Temperaturforhold under drift

I den termiske simulering indgår både UNICEF-anlægget og HOFORs ATES-anlæg som aktive borer i modellen (både hydraulisk og termisk). Dette er nødvendigt, da temperaturtransport i magasinet ikke er lineær, og superpositionsprincippet derfor ikke kan anvendes på samme måde som for hydrauliske påvirkninger.

Figur 5 viser de simulerede grundvandstemperaturer i magasinet efter 30 år ved drift af begge anlæg.



Figur 5. Beregnede temperaturer omkring ATES-boringerne og HOFORs boringer efter 30 års drift. Konturlinjerne er tegnet med 1 K ækvivalensdistance.

Efter 30 års drift ses den termiske påvirkning fra begge anlæg som tydelige temperaturfaner omkring boringerne. I centrum af systemet dannes et sammenhængende koldt reservoir med temperaturer ned mod ca. 4-6 °C, som skyldes den akkumulerede nettoinjektion af koldt vand i forbindelse med varmeproduktionen fra begge anlæg. Temperaturfanerne omkring B2 og B3 orienterer sig mod sydvest som følge af oppumpningen i HOFORs produktionsboringer, som lokalt påvirker strømningsfeltet i kalkmagasinet.

HOFORs produktionsboringer ligger imidlertid i betydelig afstand fra UNICEF-anlæggets boringer (ca. 475 m), og temperaturfanerne når ikke frem til disse boringer i den gennemførte simulering. Temperaturen ved HOFORs produktionsboringer forbliver derfor tæt på den naturlige baggrundstemperatur i magasinet på 10,3 °C.

4. Konklusion

På baggrund af de gennemførte hydrauliske og termiske modelberegninger vurderes det, at etablering og drift af et ATES-anlæg til UNICEF-bygningen i Nordhavn ikke medfører væsentlige påvirkninger af HOFORs eksisterende ATES-anlæg.

De hydrauliske beregninger viser, at ændringerne i trykniveauet i HOFORs boringer som følge af driften af UNICEF-anlægget er små og begrænsede til sæsonmæssige variationer. De største beregnede ændringer er i størrelsesordenen op til ca. 10 cm i injektionsboringerne og mellem ca. -7,5 og 7 cm i produktionsboringerne. Sammenlignet med de absolutte trykniveauvariationer

ved drift af HOFORs anlæg, hvor trykniveauet ændres med ca. 4-5 m, udgør påvirkningen fra UNICEF-anlægget kun ca. 1-2 %. Resultaterne viser dermed, at UNICEF-anlæggets bidrag til de samlede hydrauliske variationer i HOFORs borer er meget begrænset.

De termiske modelberegninger viser, at temperaturpåvirkningen fra UNICEF-anlægget er lokal og primært begrænset til området omkring UNICEF-anlæggets egne borer. Efter 30 års drift ses temperaturfaner omkring ATES-borerne, men udbredelsen af temperaturpåvirkningen er begrænset i forhold til afstanden til HOFORs produktionsboringer. Disse borer er placeret ca. 475 m fra UNICEF-anlægget og ligger fortsat i et område med temperaturer svarende til den naturlige baggrundstemperatur i magasinet på 10,3 °C. Der kan derfor ikke identificeres tegn på termisk gennemslag i HOFORs produktionsboringer i de gennemførte simuleringer.

Samlet viser modelberegningerne, at UNICEF-anlæggets hydrauliske og termiske påvirkning af kalkmagasinet er lokal og begrænset, og at driften af anlægget ikke forventes at påvirke HOFORs muligheder for energiproduktion fra deres ATES-anlæg.

5. Referencer

Balling et al. (1981). Geothermal measurements and subsurface temperature modelling in Denmark. GeoSkrifter 16, Aarhus University.

By & Havn (2025): *UNICEF Campus 4 - Option: Integreret energisystem*. Document ID: 1207_Option_Integreret energisystem, Version 1, 10-01-2025.

COWI (2023). *Ansøgning - Reinfiltration af oppumpet vand fra energicentral, Nordhavnen*. Version 2.0, 14. marts 2023. COWI A/S, Kongens Lyngby.

Clauser (2020): Thermal Storage and Transport Properties of Rocks, I: Heat Capacity and Latent Heat. In: Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Springer.

DHI Group (2023). *FEFLOW - Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System, Reference Manual*. Hørsholm, Denmark.

DMI (2026). Vejrarkiv. <https://www.dmi.dk/vejrarkiv>

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Gelhar, L., Welty, C., Rehfeldt, K. R. (1992). A critical review on field-scale dispersion in aquifers. Water resources research, 28, 7.

Kidmose, J., Sonnenborg, T. O., Henriksen, H. J., & Nilsson, B. (2022). Effective porosity and hydraulic conductivity of fractured chalk and limestone aquifers. GEUS Report 2022/13. Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS).

Sørensen, S. N. (2026). UNICEF Nordhavn ATES-anlæg. Prøveboring DGU nr. 201.20337 & DGU nr. 201.20374 - Resultater og anbefaling. Energy Machines, København.