

Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg

Slutrapport

Lars Trolborg & Jens Christian Refsgaard

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



GEUS

Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg

Slutrapport

Lars Trolborg & Jens Christian Refsgaard

Indhold

1.	Baggrund og formål	3
1.1	Projektets baggrund og formål	3
1.2	Projektets tre faser	3
1.3	Om denne slutrapport	4
2.	Kontraktmæssige og administrative forhold	5
2.1	Kontrakter	5
2.2	Møder i følgegruppe og styregruppe	5
2.3	Projektets økonomi	6
3.	Resultater og formidling	7
3.1	Teknisk afrapportering	7
3.2	Videnskabelig formidling - internationalt	8
3.3	Formidling i Danmark	10
	Bilag – Den korte historie om et unikt projekt	12

1. Baggrund og formål

1.1 Projektets baggrund og formål

Vejdirektoratet har bygget en ny motorvej gennem Silkeborg. For at reducere de støjmæssige og trafikale gener for borgerne i området er motorvejsanlægget på nogle strækninger blevet nedsænket så meget i forhold til terræn, at vejen her ligger under grundvandspejlet. I forbindelse med projekteringen af motorvejen vurderedes, at grundvandsforholdene kunne være kritiske for vejanlægget, både under anlæg af vejen og i den permanente situation. En problemstilling var, hvorvidt vejens placering nede i grundvandsmagasinet ville forårsage blokering af grundvandsstrømmen med deraf følgende opstuvning af vandet på opstrøms siden af vejen. En anden ukendt og potentielt kritisk faktor var, hvorledes vandbalance og grundvandsforholdene vil være under et ændret klima om 100 år. Store danske vejanlæg har traditionelt ikke været dimensioneret til at tage hensyn til klimaændringers effekter på grundvandsforhold, og der fandtes ikke relevant forskningsbaseret viden om, hvordan klimaændringer via ændringer i grundvandsforhold og hydrologiske forhold kan forventes at påvirke sådanne store danske vejanlæg, samt over hvor store usikkerheder der vil være på sådanne estimater.

Derfor indledte Vejdirektoratet (VD) og De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) i 2010 et samarbejde med det formål at frembringe ny viden om grundvandsforholdene af betydning for projektering, anlæg og drift af motorvejen gennem Silkeborg. VD-GEUS-samarbejdet er et forskningssamarbejde, som har kørt som et faseopdelt projekt i perioden 2010-2019. Som en del af projektet har der været et tæt samarbejde med rådgivere (COWI, Orbicon) og entreprenør (Arkil). Desuden har projektet deltaget i forskningsprojektet Hydrocast (<http://hydrocast.dhigroup.com/>) finansieret af Det Strategiske Forskningsråd.

1.2 Projektets tre faser

Samarbejdsprojektet har forløbet i ni år fordelt på tre projektfaser, som følger tidsforløbet af motorvejsbyggeriet. Væsentlige indsatser i de tre faser har været:

- Fase 1 – Projektering (2010-2013). Her var fokus på undersøgelser af, hvorledes grundvandsforhold under et fremtidigt klima kan påvirke dimensioneringen af motorvejsstrækningen gennem Silkeborg.
- Fase 2 – Anlæg (2013-2016). Her er der indsamlet unikke data for, hvorledes anlægsarbejdet påvirkede grundvandsforholdene. Desuden blev der gennemført analyser af, hvordan klimatilpasningstiltag som lokal afledning af regnvand (LAR) ville kunne påvirke grundvandsforholdene omkring motorvejen.
- Fase 3 – Monitorering (2016-2019). Her er det på baggrund af dataene fra anlægsfasen vurderet, hvor nøjagtige modelberegningerne, som i Fase 1 blev anvendt til dimensionering, er (post-audit). Endvidere er usikkerhederne for forskellige kilder (geologi, klima, modelparametre, spunsarbejde) kvantificeret.

1.3 Om denne slutrapport

Projektet har løbende været afrapporteret i form af tekniske noter, tekniske rapporter, populærvidenskabelige artikler og internationale tidsskriftartikler. Samtidig har der været regelmæssige møder i følgegruppe og styregruppe med nedskrevne beslutninger om tekniske og økonomiske forhold. Formålet med nærværende rapport er derfor at give et overblik over såvel den ledelsesmæssige som den faglige rapportering, der er sket i hele projektperioden 2010-2019.

2. Kontraktmæssige og administrative forhold

2.1 Kontrakter

Aftalegrundlaget for samarbejdet i hele projektperioden omfatter de fire aftaler der fremgår af Tabel 1.

Tabel 1 Aftalegrundlag

Titel	Dato	Bemærkning
Samarbejdsaftale om Grundvandsmodel for motorvejsstrækningen gennem Silkeborg	30. november 2010	Kontrakt med aftalegrundlag og beskrivelse af de tre faser
Tillæg nr. 1. Samarbejdsaftale om Grundvandsmodel for motorvejsstrækningen gennem Silkeborg	13. januar 2012	Omfatter fase 1 arbejde fra januar 2012 til marts 2013
Tillæg nr. 2. Samarbejdsaftale om Grundvandsmodel for motorvejsstrækningen gennem Silkeborg	1. maj 2013	Omfatter fase 2 oplæg og budget godkendt på styregruppemøde 5. november 2012
Tillæg nr. 3. Samarbejdsaftale om Grundvandsmodel for motorvejsstrækningen gennem Silkeborg	13. juni 2016	Omfatter fase 3 oplæg godkendt på styregruppemøde 3. marts 2016

2.2 Møder i følgegruppe og styregruppe

Projektets tekniske og økonomiske fremdrift er løbende blevet fulgt af en følgegruppe og en styregruppe. Rækken af møder fremgår af Tabel 2. Der findes godkendte referater fra alle møder.

Tabel 2 Møder i følgegruppen og styregruppe

Type	Dato	Møde Emne
Følgegruppe	30. november 2010	Følgegruppemøde nr. 1
Følgegruppe	15. juli 2011	Følgegruppemøde nr. 2
Følgegruppe	18. juni 2012	Følgegruppemøde nr. 3
Følgegruppe	8. oktober 2012	Følgegruppemøde nr. 4
Følgegruppe	22. april 2013	Følgegruppemøde nr. 5
Følgegruppe	1. oktober 2013	Følgegruppemøde nr. 6
Følgegruppe	11. september 2014	Følgegruppemøde nr. 7
Følgegruppe	20. august 2015	Følgegruppemøde nr. 8
Følgegruppe	20. november 2015	Følgegruppemøde nr. 9
Følgegruppe	7. maj 2016	Følgegruppemøde nr. 10
Følgegruppe	19. januar 2017	Følgegruppemøde nr. 11
Følgegruppe	6. juni 2018	Følgegruppemøde nr. 12

Følgegruppe	3. april 2019	Følgegruppemøde nr. 13
Følgegruppe	3. september 2019	Følgegruppemøde nr. 14
Følgegruppe	29. oktober 2019	Følgegruppemøde nr. 15
Styregruppe	30. november 2010	Styregruppemøde nr. 1
Styregruppe	6. januar 2012	Styregruppemøde nr. 2
Styregruppe	5. november 2012	Styregruppemøde nr. 3
Styregruppe	12. november 2013	Styregruppemøde nr. 4
Styregruppe	11. november 2014	Styregruppemøde nr. 5
Styregruppe	3. marts 2016	Styregruppemøde nr. 6
Styregruppe	9. februar 2017	Styregruppemøde nr. 7
Styregruppe	29. maj 2018	Styregruppemøde nr. 8
Styregruppe	15. november 2019	Styregruppemøde nr. 9

2.3 Projektets økonomi

Økonomien for de tre projektfaser fremgår af Tabel 3.

Tabel 3 Projektøkonomi

Faktureret	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Samlet
<i>Udlæg</i>	210.991 kr.	194.971 kr.	96.176 kr.	502.138 kr.
<i>Lønudgifter</i>	3.927.065 kr.	3.164.933 kr.	2.286.115 kr.	9.378.113 kr.
<i>I alt</i>	4.138.056 kr.	3.359.904 kr.	2.382.291 kr.	9.880.251 kr.
<i>Budgetramme ifl. aftalegrundlag</i>	4.139.606 kr.	3.408.801 kr.	2.501.389 kr.	10.049.796 kr.

3. Resultater og formidling

3.1 Teknisk afrapportering

Rapporteringen af de teknisk-faglige resultater er sket løbende, bl.a. ved hjælp af noter og PowerPoint præsentationer på følge- og styregruppemøder. De væsentligste resultater er blevet samlet i GEUS rapporter (Tabel 4).

Tabel 4 Videnskabelig GEUS rapporter

Forfattere	Dato	Titel	Rapport	weblink
Troldborg L, Refsgaard JC, Kidmose J, Escrivà MM & Nyegaard P	2011	Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg – Statusrapport fase 1.1 og 1.2	GEUS Rapport 2011/136	https://www.geus.dk/media/21284/geusrapport2011_136_web-1.pdf
Troldborg L, Refsgaard JC, Kidmose J & Randall M	2013	Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg - Statusrapport fase 1.3	GEUS Rapport 2013/43	https://www.geus.dk/media/21282/geusrapport2013_43_web.pdf
Jakobsen PR, Kidmose J & Rasmussen ES	2014	Geologien i motorvejsstrækningen ved Silkeborg - Profilbeskrivelser og opdatering af geologisk model fase 2	GEUS Rapport 2014/77	https://www.geus.dk/media/21281/geusrapport2014_77_web.pdf
Rasmussen P, Troldborg L & Wiese MB	2015	Forslag til fremtidigt grundvandspejlestationsnet for motorvejsstrækning gennem Silkeborg	GEUS Rapport 2015/80	https://www.geus.dk/media/21283/geusrapport2015_80_web.pdf
Troldborg L., Ondracek M, Kidmose JB, Koch J & Refsgaard JC.	2019	Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg – Teknisk rapport fase 3	GEUS Rapport 2019/29	

3.2 Videnskabelig formidling - internationalt

Projektets videnskabelige resultater er formidlet internationalt dels via artikler i anerkendte internationale videnskabelige tidsskrifter med peer review (Tabel 5) og dels som præsentationer på international konferencer (Tabel 6).

Tabel 5 Artikler i internationale videnskabelige tidsskrifter

Forfattere	Dato	Titel	Tidsskrift	weblink
Kidmose J, Refsgaard JC, Trolborg L, Seaby LP & Escriva MM	2013	Climate change impact on groundwater levels: ensemble modelling of extreme values	Hydrology Earth System Science 17, p1619–1634	https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/1619/2013/
Randall MT, Trolborg L, Refsgaard JC & Kidmose J	2013	Assessing urban groundwater table response to climate change and increased stormwater infiltration	Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 28, p33–36	https://eng.geus.dk/media/10927/nr28_p33-36.pdf
Kidmose J, Trolborg L, Refsgaard JC & Bischoff N	2015	Coupling of a distributed hydrological model with an urban storm water model for impact analysis of forced infiltration	Journal of Hydrology 525, p506–520	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415002565
Jakobsen PR, Rasmussen ES, Dybkjær K & Kidmose J	2016	Miocene deposits at Silkeborg, Jylland, and their influence on hydrology	Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 35, p9–12	https://eng.geus.dk/media/10848/nr35_p09-12.pdf
He X, Lucatero D, Ridler ME, Madsen H, Kidmose J, Hole Ø, Petersen C, Zheng C, Refsgaard JC	2019	Real-time simulation of surface water and groundwater with data assimilation	Advances in Water Resources, 127, 13-25	http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.004
Kidmose J, Trolborg L & Refsgaard JC		Ground water model predictions under changing conditions - a post audit	Submitted 2019	
Trolborg L, Ondracek M, Koch J, Kidmose J & Refsgaard JC		Quantifying stratigraphic uncertainty in groundwater modelling for infrastructure design	Submitted 2019	

Tabel 6 Præsentationer på internationale konferencer

Forfatter	Dato	Titel	Konference
Kidmose J, Troldborg L, Refsgaard JC & Seaby LP	2011	Effects of future climate change on groundwater levels at a sub-groundwater table motorway construction in Denmark	GSA annual meeting 2011, Minisota
Kidmose J, Troldborg L, Refsgaard JC & Randall M	2012	Integration of models for better quantification of urban hydrology: Coupling urban drainage system models and distributed groundwater models	AGU Dec 2012, San Francisco
Kidmose J, Troldborg L & Refsgaard JC	2016	Comparing the effects of climate change and mitigation measures on urban groundwater resources	43rd IAH congress 2016, Montpellier
Kidmose J, Troldborg L & Refsgaard JC	2019	Post-audit of a hydrological model: Evolution of predictive uncertainty in a 9 year modelling exercise	EGU General assembly 2019 HS1.2.11, Vienna
Ondracek M, Troldborg L, Koch J, Kidmose J, Refsgaard JC	2019	Comprehensive analysis of multiple sources of uncertainties in an integrated hydrological model focusing on simulated groundwater levels	EGU General assembly 2019 HS1.2.11, Vienna

3.3 Formidling i Danmark

Formidlingen i Danmark er sket dels via artikler i populærvidenskabelige tidsskrifter (Tabel 7) og dels via præsentationer på møder og seminarer (Tabel 8).

Derudover har projektet haft presseomtale ved projektets opstart i 2010, ligesom der planlægges information til pressen i forbindelse med projektafslutningen i 2019.

Tabel 7 Populærvidenskabelige artikler

Forfatter	Dato	Titel	Tidsskrift	weblink
Troldborg L, Kidmose J, Refsgaard JC, Boesen M, Jørgensen A	2016	Grundvand på motorvejen? Er der behov for klimasikring af veje? Eksempel fra motorvejen gennem Silkeborg	Trafik & Veje 2016 september	https://issuu.com/trafikog-veje/docs/togv_sep_2016_qwfx_for_abonenter/10
Refsgaard JC, Hole Ø, Ridler M, Lucatero D, Petersen C, He X, Troldborg L, Kidmose J & Madsen H	2017	Real-tids varsling af grundvand og afstrømning ved motorvejen i Silkeborg	Vand og Jord 2-2017	http://www.vand-og-jord.dk/vj217.htm
Troldborg L, Boesen M, Jørgensen A, Kidmose J & Refsgaard JC	2017	Klimatilpasning - mulighed og faldgrube	Vand og Jord 2-2017	http://www.vand-og-jord.dk/vj217.htm
Kusnitzoff JU (+ interview med Lars Troldborg og Mike Boesen)	2019	Klimatilpasning truede med at oversvømme ny motorvej	Geoviden, nr. 2 juni 2019, side 30-31	http://www.geocenter.dk/wp-content/uploads/2019/06/Geoviden_2_2019_samlet-1.pdf

Table 8 Eksterne projektmøder og seminarer

Type	Dato	Møde Emne	Deltagere
COWI	04-06-2010	Motorvej Silkeborg - et kort møde angående modellering ved Silkeborg	GEUS, COWI
Seminar	30-11-2010	Opstartsseminar. Orientering om projektsamarbejdet	Rådgivere, kommuner, Region Midt, DMI, VD, GEUS
COWI	01-12-2010	Motorvej Silkeborg - status møde angående modellering ved Silkeborg	GEUS, COWI
COWI	12-01-2011	Grundvandmodellering, status og actions mv	VD, GEUS, COWI
COWI	04-04-2011	Motorvej Silkeborg - et kort møde angående klimascenarie modellering	GEUS, COWI
Seminar	19-08-2013	Scenarie møde, Silkeborg kommune	GEUS, Silkeborg kommune, Silkeborg forsyning
Orbicon	19-09-2011	Samarbejde omkring Mike Urban Silkeborg	Orbicon, GEUS
Seminar	09-02-2016	VD Seminar om HydroCast	GEUS, VD
Seminar	10-05-2016	Seminar om grundvandsmodellen i Silkeborg Nord	VD, GEUS, Silkeborg Forsyning, Silkeborg Kommune, Orbicon
COWI	20-06-2016	Silkeborgmotorvejen. Grundvandsstand på bystrækningen	GEUS, COWI, VD
Seminar	30-11-2016	Slutkonference for HydroCast	Universiteter, forskningsinstitutioner, rådgivere, kommuner, statslige myndigheder

Bilag – Den korte historie om et unikt projekt

VD-GEUS forsknings- samarbejde om Silke- borg Motorvejen

Den korte historie om et unikt projekt



November 2019
www.mosikt.dk

1. Baggrund og formål

Vejdirektoratet har anlagt en motorvej gennem Silkeborg, og for at reducere de støjmæssige og trafikale gener for borgerne i området er motorvejsanlægget på nogle strækninger blevet nedsænket så meget i forhold til terræn, at vejen her ligger under grundvandsspejlet. I forbindelse med projekteringen af motorvejen vurderedes, at grundvandsforholdene kunne være kritiske for vejanlægget, både under anlæg af vejen og i den permanente situation. En problemstilling var, hvorvidt vejens placering nede i grundvandsmagasinet ville forårsage blokering af grundvandsstrømmen med deraf følgende opstuvning af vandet på nordsiden af vejen. En anden ukendt og potentielt kritisk faktor var, hvorledes vandbalance og grundvandsforhold vil være under et ændret klima om 100 år. Store danske vejanlæg har traditionelt ikke været dimensioneret til at tage hensyn til klimaændringers effekter på grundvandsforhold, og der fandtes ikke relevant forskningsbaseret viden om, hvordan klimaændringer via ændringer i grundvandsforhold og hydrologiske forhold kan forventes at påvirke sådanne store danske vejanlæg, samt over hvor store usikkerheder der vil være på sådanne estimater.

Derfor indledte Vejdirektoratet (VD) og De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) i 2010 et samarbejde med det formål at frembringe ny viden om grundvandsforholdene af betydning for projektering, anlæg og drift af motorvejen gennem Silkeborg. VD-GEUS-samarbejdet er et forskningssamarbejde, som har kørt som et faseopdelt projekt i perioden 2010-2019. Som en del af projektet har der været et tæt samarbejde med rådgivere (Cowi, Orbicon) og entreprenør (Arkil). Desuden har projektet deltaget i forskningsprojektet Hydrocast (<http://hydrocast.dhigroup.com/>) finansieret af Det Strategiske Forskningsråd.

Denne artikel giver en kort beskrivelse af væsentlige dele af projektet med fokus både på de teknisk-videnskabelige resultater og erfaringer fra et langvarigt forskningssamarbejde mellem en produktionsvirksomhed og en forskningsinstitution.

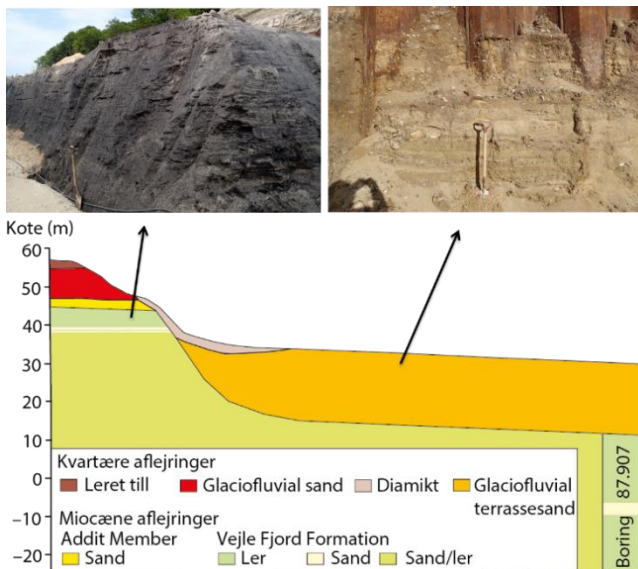
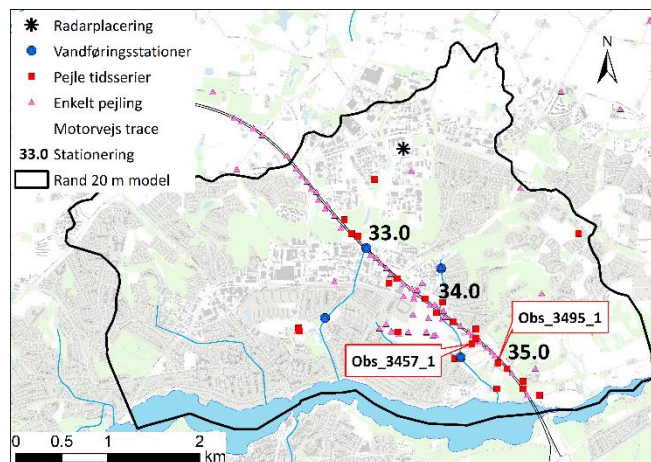
2. Motorvej og geologi i Silkeborg

Den nye motorvej fra Låsby til Funder (Figur 1) passerer den østligste del af Silkeborg Langsø via en lavbro og løber herefter gennem et lavtliggende område i Silkeborg før den løber op gennem det bakkede terræn ved Dyrehaven (Figur 2). På en del af det lave område er vejen overdækket og nedsænket ned til 6 m under terræn. Geologien i området (Figur 3) består af miocæne sand- og lerlag fra Vejle Fjord formationen, overlejret af moræneler i de højtliggende områder. I dalen ned til Silkeborg Langsø findes en højpermeabel, tynd sandforekomst (terrassemagasin) i stedet for moræneleret. Motorvejen er nedsænket i terrassemagasinet. De miocæne sandforekomster rummer regionale grundvandsmagasiner, mens terrassemagasinet er et lokalt magasin med begrænset udstrækning. Kontakten mellem terrassemagasinet og de miocæne magasiner, som oprindeligt var ukendt, viste sig at være stærkt begrænset (Figur 3), hvilket er af afgørende betydning for hvor meget vand, der transporteres gennem terrassemagasinet ned til Silkeborg Langsø og dermed for hvor meget motorvejskonstruktionen og klimaændringer (ændrede nedbørsforhold) påvirker grundvandsforholdene.



Figur 1. Motorvejens forløb gennem Silkeborg med angivelse af udstrækningen af 20 m og 100 m modellerne og placeringen af det geologiske tværsnit (a – a') som vises i Figur 3.

Figur 2. Motorvejstraceet fra Silkeborg Langsø op gennem Dyrehaven med stationering, som der refereres til i Figur 6 og Figur 7, samt placering af pejleboringer, vandføringsmålestationer og en ny nedbørsradar.



Figur 3. Geologisk snit langs motorvejstraceet (a – a' i Figur 1). Aflejringeren 'Addit Member' er en del af den såkaldte Billund Formation. Billederne over tværsnittet viser vandstandsene over miocæne lerbænk i skrænten mellem bakkerne og terrassemagasinet – blotlagt i forbindelse med udgravningerne til vejanlægget. Lerforekomsterne på dette sted sandsynliggør, at der er dårlig hydraulisk kontakt mellem de overliggende moræneforekomster og det underliggende miocæne sandmagasin.

3. Grundvandsmodellen og dens anvendelser

Der er opbygget en detaljeret grundvandsmodel for området omkring motorvejstraceet nord for Silkeborg Langsø. Ryggraden i grundvandsmodellen er en geologisk model, som løbende er blevet udbygget på grundlag af informationer fra borer og udgravninger. Modelområdet,

som er vist i Figur 1, er inddelt i beregningsceller på horisontalt 20 m gange 20 m og vertikalt opdelt i tre beregningslag, som følger geologien. For at beskrive randbetingelserne i 20 m modellen dynamisk, er der opstillet en større model med et 100 m grid, som så igen får sine randbetingelser fra GEUS' nationale vandressourcemodel for Midtjylland (500 m grid). Yderligere informationer om grundvandsmodellen kan findes i /J-3/.

I forbindelse med motorvejsprojektet har COWI indsamlet kontinuerte trykniveaudata fra 35 borer i terrassemagasinet, mens Orbicon har målt vandføringer fire steder i vandløbssystemet inde i byen.

Grundvandsmodellens resultater blev benyttet af COWI i projekteringsfasen (2010-2013) til ved hjælp af en stationær 2 m model for nærområdet omkring motorvejskonstruktionen at vurdere, hvorvidt vejkonstruktionen ville blokere for vandets strømning i terrassemagasinet fra bakkerne ned mod Silkeborg Langsø. Konklusionen herom var, at opstuvningseffekten ville holde sig inden for få cm, forudsat at spunsvæggen stoppede ½ meter inden bunden af det højpermeable terrassemagasin.

Grundvandsmodellen blev desuden i projekteringsfasen benyttet til at estimere den dimensiongivende grundvandsstand, som kan forventes i et fremtidigt klima i 2100 (se afsnit 3.3). I de efterfølgende projektfaser blev modellen benyttet til at vurdere effekten af lokal afledning af regnvand, som er et populær klimatilpasningstiltag i mange byer, herunder Silkeborg (se afsnit 3.4). I forbindelse med anlægsfasen blev der lavet store udgravninger, hvor geologien blev blotlagt og der blev gennemført store grundvandssænkninger. Data herfra er blevet benyttet til at vurdere modellens pålidelighed i et såkaldt post-audit studie (se afsnit 3.1).

For at få en bedre beskrivelse af de befæstede arealer og vandafleningen herfra er grundvandsmodellen desuden blevet koblet med en MIKE URBAN model, som Orbicon havde opstillet for Silkeborg Forsyning /J-4/.

4. Teknisk-videnskabelige resultater

4.1 Hvor pålidelig er grundvandsmodellen?

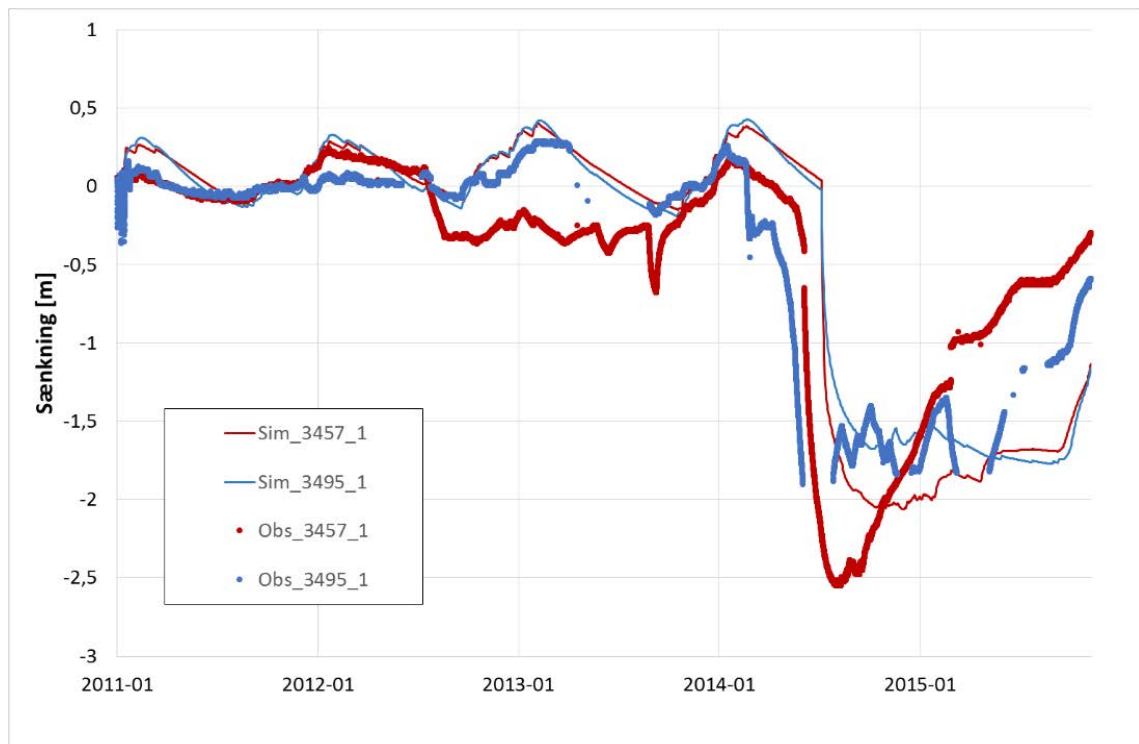
Grundvandsmodeller bliver typisk kalibreret mod data, der afspejler den nuværende situation med hensyn til klimaforhold og oppumpninger. Men modellerne benyttes som regel til at forudsige andre forhold, som fx et ændret klimaforhold eller ændret oppumpning. Vi har af gode grunde ikke klimadata for 2100 og som regel heller ikke grundvandsdata for situationer med andre oppumpninger. Det betyder, at en grundvandsmodels evne til at forudsige, det den skal bruges til, sjældent kan testes direkte – og vi må derfor forvente betydelige usikkerheder på modelforudsigelserne.

Grundvandsmodellen for Silkeborg blev i første omgang kalibreret mod de eksisterende grundvandstrykniveau- og vandføringsdata for en periode før anlægsarbejdet begyndte. De eksisterende data består af tidsserier på lidt mere end 2 år af grundvandsdata fra COWI's netværk af 35 borer samt Orbicon's fire vandføringsstationer. Desuden har vi benyttet historiske data fra 97 andre borer i området. De 97 borer er beliggende over et større område og indeholder typisk kun en enkelt eller ganske få observationer for perioden 1990-2011. Eftersom formålet med modellen var at kunne forudsige grundvandsstande langs motorvejen og deres respons på ekstreme nedbørsforhold, er de kontinuerte observationer, herunder beskrivelse af amplituderne i årstidsfluktuationerne, tildelt størst vægt i kalibreringen. For at udnytte data fra eksisterende prøvepumpninger i området er modellens hydrauliske ledningsevner i afgrænsede områder blevet fastsat til parameterverdier, som blev fundet ved prøvepumpningerne. Resultatet af modelkalibreringen var hydrauliske ledningsevner,

som var i god overensstemmelse med eksisterende prøvepumpninger i området, og som gav relativt gode beskrivelser af såvel middeltrykkniveau som tidsmæssige fluktuationer langs motorvejen. Den grundvandsmodel, vi udviklede på det grundlag, og som blev benyttet til at estimere den dimensionsgivende grundvandsstand i et fremtidigt klima i 2100 (se afsnit 3.3), vurderede vi som værende den bedst mulige til formålet, med de begrænsninger som datagrundlaget giver.

Eftersom de eksisterende data kun omfatter en kort periode og kun indeholder data fra en "uforstyrret" situation, hvor de årlige variationer i grundvandstrykniveau er ca. 15 cm, vil modelforudsigelser af grundvandet i andre situationer (et andet klima), være behæftet med betydelig usikkerhed. For at teste modellens pålidelighed har vi efterfølgende gennemført et såkaldt "post audit" test, som er en test af en model mod nye data fra en periode, efter at modellen blev færdigkalibreret. Vi fik en unik mulighed for at teste modellen mod data fra anlægningsperioden, hvor der blev gennemført omfattende sænkninger af grundvandsspejlet for at tørlægge vejtracéet under konstruktionsarbejdet.

Via et godt samarbejde med entreprenøren (Arkil) blev der indsamlet data om oppumpede vandmængder samtidig med, at der fortsat blev målt grundvandstrykniveau i COWI's netværk af 35 borer. Data om oppumpede vandmængder findes ikke på dagsbasis, men som akkumulerede vandmængder over perioder på uger eller måneder fordelt over konstruktionsperioden fra 27.08.2013 til 30.01.2015. Vi har ved post-audit testen fordelt hele den oppumpede vandmængde ligeligt over de 5½ måneder, hvor hovedparten af oppumpningen foregik (10.7.2014 – 22.12.2014). Resultatet er illustreret i Figur 4, som viser observerede og simulerede sænkninger, relativ til gennemsnitstrykniveauet 2011-2012, for to borer. Det ses, at modellen er i stand til at simulere størrelsen af sænkningerne af grundvandsspejlet overraskende nøjagtigt. De mindre uoverensstemmelser mellem tidsforløbet af de observerede og simulerede sænkninger kan formentlig tilskrives, at oppumpningen er fordelt ensartet over 5½ måned, fordi den tidlige fordeling af oppumpninger inden for de 17 måneders anlægsarbejde ikke kendes nøjagtigt. Med sænkninger på henholdsvis 2 og 2½ m i test-situationen, sammenlignet med typiske sæsonvariationer på 15 cm i kalibreringssituationen, er post-audit valideringstesten en meget stærk test af modellen. På baggrund af post audit testen kan vi nu konkludere at grundvandsmodellen har særdeles gode prædiktive evner til forudsigelse af dynamiske forhold påvirket af ændringer i fx nedbør, oppumpninger eller dræningssystemer, dvs. at dimensioneringsgrundlaget er robust for så vidt angår klimapåvirkninger af grundvandsspejlet.



Figur 4. Simulerede og observerede sænkninger i forhold til middeltrykkniveauet 2011-2012 for to borer i perioden, hvor der blev lavet store grundvandssænkninger i forbindelse med konstruktionsarbejdet. Placeringerne af de to borer er vist i Figur 2.

4.2 Hvor meget betyder geologisk information

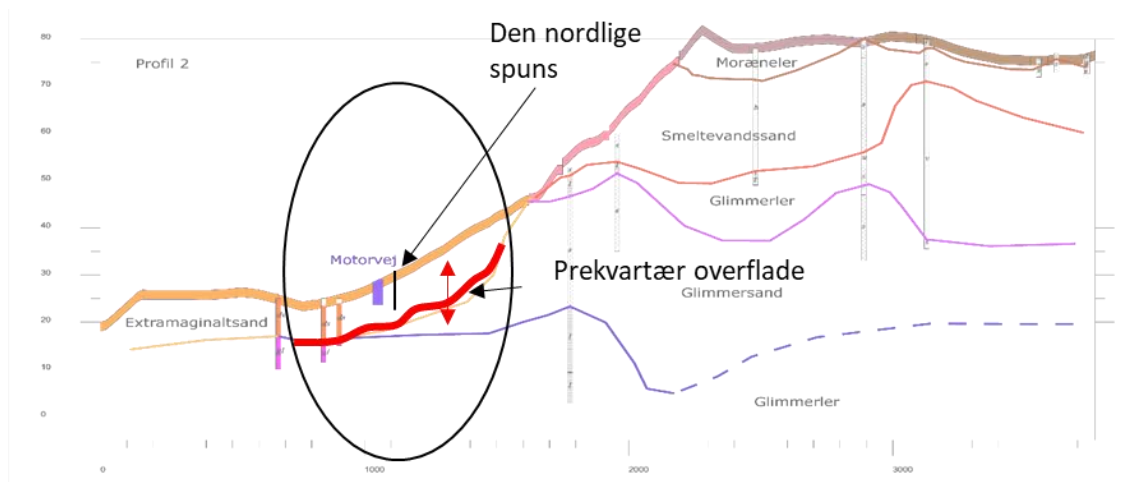
Geologiske data og geologisk forståelse er tidligere dokumenteret at have afgørende betydning for kvaliteten af en grundvandsmodel og nøjagtigheden af dens prædiktioner. I forbindelse med projekteringen af motorvejen er der indsamlet en omfattende mængde geologiske data svarende til, eller måske lidt mere end, almindelig praksis for tilsvarende infrastrukturprojekter. I de efterfølgende to projektfaser (anlægsfasen og den permanente fase) er der indsamlet og analyseret yderligere data. Det har gjort det muligt at analysere, hvor stor værdien af de yderligere geologiske data er.

Udgravningerne til motorvejen gjorde det muligt at se de geologiske lagfølger i dybe skrænter med flere hundrede meters bredde *(V-1)*. Før udgravningerne kunne geologien kun vurderes ud fra punktmålinger i borer. Den geologiske model, som indgår i grundvandsmodellen er derfor blevet opdateret med den nye geologiske viden. Hovedparten af den tidligere geologiske model blev bekræftet af de nye data fra udgravningerne, men den geologiske model blev justeret med nogle detaljer omkring sammenhængen mellem geologiske lag ved skræntfoden. Disse forbedringer viste sig at have en markant betydning i form af en mere nøjagtig modelsimulering (uden omkalibrering af modellen). Såfremt de geologiske justeringer havde været væsentlig større, ville det formentlig også have resulteret i forbedrede modelsimuleringer, men måske først efter en omkalibrering af modellen.

En forudsætning i projekteringen af motorvejskonstruktionen er at der skal være afstand mellem bunden af spuns og bunden af terrassemagasinet. Såfremt der er for lille eller ingen mellemrum mellem spuns og bunden af terrassemagasinet er der risiko for at der kan ske en opstuvning af vand på opstrøms side af konstruktionen, med mulighed for at vandet i værste tilfælde kan løbe ind på motorvejen. Usikkerhederne på afstanden mellem bunden af spuns

og overkanten af prækvartæret er blevet analyseret under post audit af modelberegningerne med geostatistiske metoder og usikkerhedernes betydningen for grundvandsstanden omkring motorvejsanlægget er beregnet med grundvandsmodellen. Den geologiske usikkerhed tæt på bunden af spunsen viste sig at forårsage usikkerheder på op til 1 m i standard afvigelse af simulerede grundvandsstand indenfor en 500 m zone af spunsen. Denne usikkerhed på simulering af grundvandsstanden er større end usikkerheden forårsaget af (usikre) klimændringer. I bagklogskabens klare lys kan vi derfor konkludere, at det ville have været værdifuldt at inddrage den geologiske usikkerhed allerede i projekteringsgrundlaget. Risikoen er dog efterfølgende blevet afværget ved anlæggelse af et dræn som skal fange vandet før det løber ind på vejen /J-7/.

Alt i alt viser resultaterne, at geologiske data er meget værdifulde som grundlag for en grundvandsmodel.



Figur 5. Prækvartærets betydning for opstuvning af grundvand opstrøms spuns er evalueret ved at danne forskellige realisationer af prækvartærets overflade (lige sandsynlige realisationer ift. tilgængelige boringsdata)

4.3 Klimasikring af motorvejen

Kendskab til det maksimale grundvandsspejl i 2100 er væsentlig, fordi vandtætte vejkonstruktioner under grundvandsspejlet er meget dyrere end konstruktioner, der ikke skal kunne tåle at stå under vand. Det var derfor uhyre vigtigt at finde ud af, over hvor lang en strækning motorvejen i Silkeborg skulle bygges som en vandtæt konstruktion.

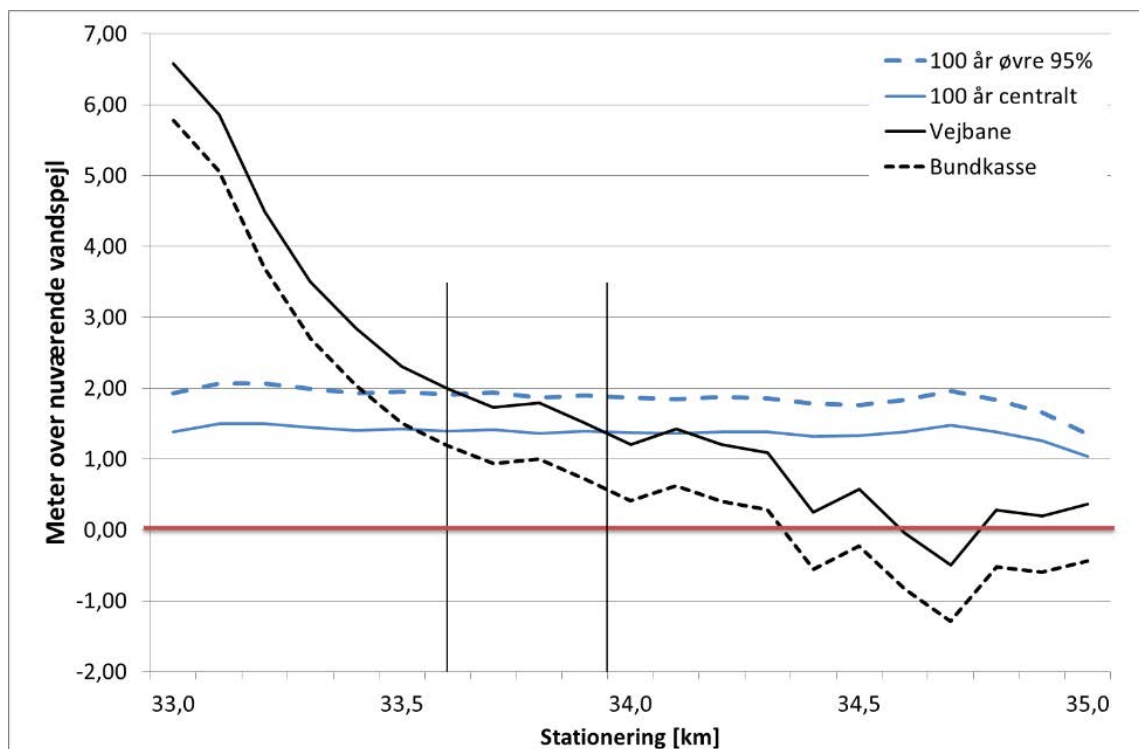
Basis for den dimensionsgivende grundvandsstand er valgt som en 100-årshændelse for klimaet i 2100. For at tage højde for usikkerhederne er der beregnet et 95% konfidensinterval. Det indebærer, at der er 2½% risiko for at den "sande" 100-års hændelse er højere end det øvre punkt i konfidensintervallet. 100-års hændelserne er beregnet på baggrund af 20 års simulerede grundvandsstande for henholdsvis 1991-2010 og 1981-2000. For hver af de to perioder er de 20 årlige maksimale værdier udvalgt og en såkaldt Gumbel ekstremværdi sandsynlighedsfordeling er tilpasset, hvorefter 100 års hændelsen kan estimeres.

Vi har valgt klimafremskrivninger fra ni klimamodeller, som stammer fra EU projektet ENSEMBLES. Alle ni klimamodeller benytter et 25 km beregningsgrid og producerer daglige værdier af temperatur, nedbør og andre klimavariabler for perioden 1951-2100. Ved at sammenholde resultaterne fra klimamodellerne med DMI's 10 km grid data fra perioden 1991-2010 er hver af modellerne blevet nedskaleret og fejlrettet med to forskellige metoder (bias

korrektion), så de giver samme middelværdi for nedbør, temperatur og reference fordampning som de observerede data. De forskellige klimamodeller simulerer forskellige ændringer i klimaet fra 1991-2010 til 2081-2100 /J-3/.

Medianen af de ni klimamodeller er herefter benyttet til estimering af det dimensionsgivende grundvandsspejl, mens spredningen mellem de ni modeller benyttes som et mål for klimausikkerheden. Den samlede usikkerhed på den dimensionsgivende grundvandsstand er herefter fremkommet ved at aggregere usikkerheden fra Gumbel fremskrivningen fra de 20 års data til en 100-års hændelse med usikkerheden fra klimamodellerne og biaskorrektionsmetoderne /J-3/.

Slutresultaterne fra beregningerne af den dimensionsgivende grundvandsstand fremgår af Figur 6, som over en strækning på 2000 m viser forskellen mellem vejens overflade og grundvandsstanden for forskellige situationer. Fra de to lodrette streger i figuren ses, at 1050 m vejstrækning (st. 33.95 til 35.0) skal laves vandtæt, såfremt det centrale skøn for 100-års hændelse benyttes som dimensioneringsgrundlag, mens det vil dreje sig om 1400 m (st. 33.6 til 35.0), hvis der skal indlægges en sikkerhedsfaktor svarende til et 95% konfidensinterval.



Figur 6. Størrelsen af 100-års hændelse centralt estimat og øvre 95% konfidensinterval i forhold til det nuværende gennemsnitlige grundvandsspejl. Figuren viser endvidere bunden af vejkonstruktionen og vejens kote i forhold til nuværende grundvandsspejl mellem stationering 33,0 og 35,0 af motorvejen.

Resultaterne af usikkerhedsanalyserne viser, at den væsentligste usikkerhed (70%) ved beregning af 100-års hændelserne stammer fra selve Gumbel estimatet, hvilket afspejler usikkerhed på den naturlige klimavariation fra år til år, mens usikkerheden fra klimamodellerne bidrager med ca. 25% og usikkerheden på bias korrektionen af klimamodellerne med bare 5%.

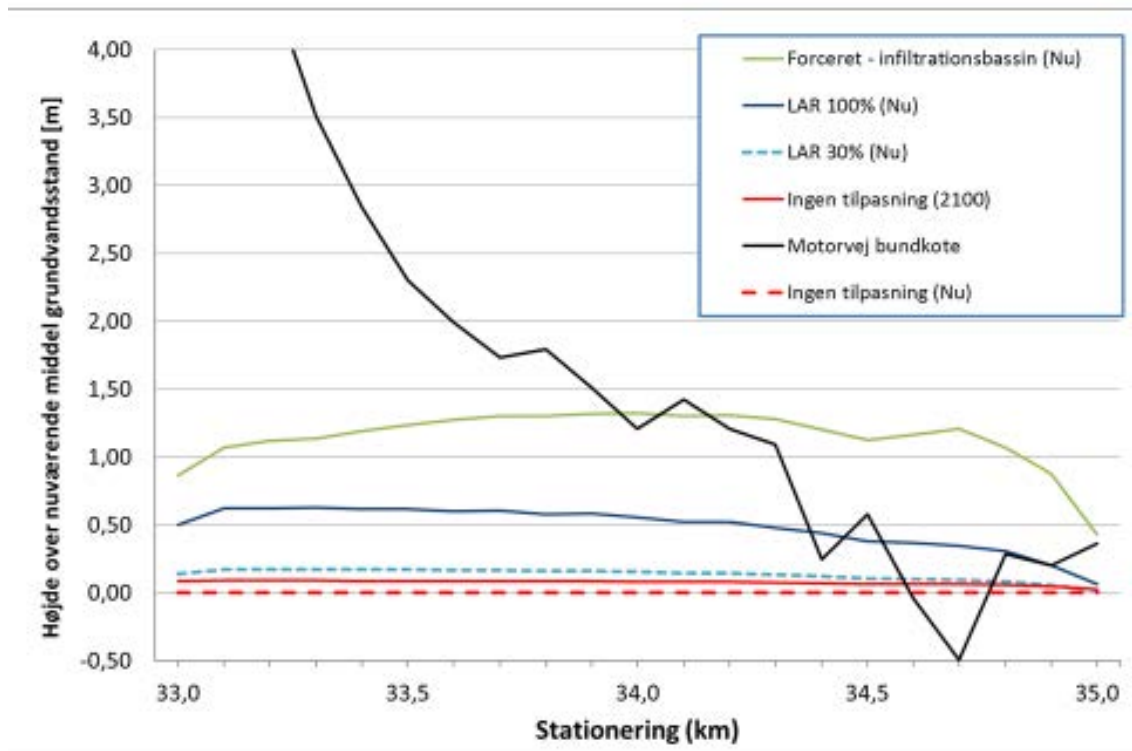
Beregningsresultaterne viste, at klimaeffekten i det konkrete tilfælde ved Silkeborg er væsentlig mindre end usikkerheden på den naturlige klimavariation, som afspejles af usikkerheden på Gumbel fremskrivningen fra de 20 års simuleringer til en 100-års hændelse. Det vil sige, at terrassemagasinet ikke er særlig klimafølsomt, hvilket hænger godt sammen med, at trykniveauerne i terrassemagasinet varierer meget lidt hen over året – typisk 15 cm mod mere end 1 m i de fleste andre grundvandsmagasiner i Danmark. Det har betydet en besparelse i anlægsprisen for motorvejen i Silkeborg i forhold til en situation, hvor det var forudsat, at terrassemagasinet havde haft samme klimafølsomhed som gennemsnittet af grundvandsmagasiner.

Andre terrænnære grundvandsmagasiner er væsentlig mere klimafølsomme, og beregninger herfra viser grundvandsstigninger som mange steder kan blive ½-1 m som følge af klimaændringer. En grundig vurdering af et grundvandsmagasins klimafølsomhed kræver både gode observationsdata med flere års kontinuerte pejlinger og tilhørende vandføringsdata og en god grundvandsmodel baseret på en god geologisk forståelse af området.

4.4 Klimatilpasning – pas på

Et af de mest anvendte tiltag i klimatilpasningen i danske byer er lokal infiltration af regnvand, en såkaldt LAR (Lokal Afledning af Regnvand) løsning, hvor vand fra tage og befæstede arealer infiltreres direkte i faskiner eller regnbede i nærheden af de befæstede arealer. Infiltration af regnvand vil øge grundvandsdannelsen og dermed øge grundvandsstanden. Vi har derfor undersøgt, hvilken effekt forskellige strategier for infiltration af regnvand kunne have for grundvandsspejlet langs motorvejen /J-6/. Tre scenarier er analyseret med grundvandsmodellen: A) konventionel drænaflledning; B) infiltrationsbassiner; og C) LAR. Området i Silkeborg består af 66% permeabel og 34% impermeable arealer. For Scenarie A forudsættes, at al nedbøren fra de impermeable områder løber direkte ud i vandløbssystemet. I Scenarie B forudsættes, at al nedbøren fra de impermeable områder ledes til opsamlingsbassiner, hvorfra vandet infiltreres til grundvandet. I Scenarie C forudsættes, at al vandet fra impermeable overflader infiltreres lokalt. Desuden er der foretaget beregninger, for situationer, hvor Scenarierne B og C ikke udbredes til hele det impermeable område. Figur 7 viser udvalgte beregningsresultater for den gennemsnitlige grundvandsstand langs motorvejen (ikke for dimensionsgivende 100-års hændelser som i Figur 6). Heraf ses, at infiltrationsbassiner og LAR løsninger har en meget voldsom effekt på grundvandsstanden. Mens effekten af klimaændringer er på ca. 10 cm, vil en 100% konvertering til infiltrationsbassiner eller LAR resultere i øget grundvandsstand på ca. 1 m henholdsvis 0,5 m langs motorvejen, og selv en 30% implementering af de to strategier vil have markant indflydelse på grundvandsstanden.

Analysen fra Silkeborg viser, at en klimatilpasningsløsning i dette tilfælde skaber et andet, og måske større, problem, i stedet for blot af afhjælpe det problem den var tiltænkt. Analyser for andre lokaliteter vil, afhængig af hydrogeologiske forhold, give forskellige konklusioner med hensyn til effekter og eventuelt uønskede bivirkninger ved klimatilpasningstiltag som LAR. Hvis der er gode infiltrationsforhold og grundvandsspejlet ligger tilstrækkelig dybt, vil LAR ikke have uønskede bivirkninger i form af for store stigninger i grundvandsspejl. Men i andre situationer, som fx Silkeborg, hvor der er gode infiltrationsforhold og et højt grundvandsspejl, vil for megen anvendelse af LAR kunne risikere at skabe uønskede problemer for vej anlæg og bygninger. Det er derfor vigtigt at lave en helhedsvurdering, hvor såvel overfladenære hydrauliske forhold som grundvandsforhold inddrages på lige fod i analyserne.



Figur 7. Placeringen af den gennemsnitlige grundvandsstand sammenlignet med motorvejen mellem stationering 33,0 og 35,0 af motorvejen for tre klimatilpasningsscenarier. For den nuværende drænstrategi viser de nederste to kurver at der er ca. 10 cm forskel på grundvandsstanden under det nuværende klima (Nu) og det fremtidige klima (2100). De andre kurver viser grundvandsspejl under det nuværende klima for henholdsvis 100% implementering af de to alternative strategier infiltrationsbassiner og LAR og 30% implementering af LAR

5. Erfaringer om forskningssamarbejde

VD-GEUS-samarbejdet adskiller sig fra et rådgivningsprojekt ved at have et bredt formuleret formål med krav om, at aktiviteterne skulle indeholde væsentlige elementer af forskning, dvs. frembringe ny viden som kan publiceres videnskabeligt. GEUS har, indenfor den brede formålsparagraf og de aftalte økonomiske rammer, haft frie hænder til at identificere og foreslå projektaktiviteter, som vurderedes at kunne være relevante for Silkeborg motorvejen. Det har betydet, at nogle projektaktiviteter har været defineret af specifikke krav fra VD, fx i forbindelse med projekteringen af vejen i Fase 1. Andre aktiviteter er blevet initieret på baggrund af ideer fra GEUS, fx arbejdet med konsekvensen for grundvandsspejlet af fremtidige udbygninger af LAR i Silkeborg. I alle tilfælde har mulige projektaktiviteter været diskuteret på følgegruppe- og styregruppemøder, som besluttede hvilke aktiviteter, der skulle iværksættes. Forskningssamarbejde kan have værdi for en organisation som VD, i forbindelse med projekter med følgende karakteristika:

- Projektet skal have en kompleksitet og indebære risici, som kræver betydelige undersøgelser.

- Projektet skal indeholde faglige nye problemstillinger, hvortil der ikke eksisterer relevante standardprocedurer og værktøjer blandt danske rådgivere. Forskningspartneren skal have tid til at udvikle og teste nye metoder og værktøjer som efterspørges i forbindelse med projektets gennemførelse. Eftersom der ikke er betydelig erfaring fra hidtidige projekter med tilsvarende problemstillinger og derfor usikkerhed omkring hvordan løsninger skal udformes, er det vigtigt at forskningspartneren også får mulighed for at afsøge andre relevante aspekter end dem, der på forhånd er specificeret af VD.
- Projektet skal have en varighed på mindst et par år og en økonomi, som gør det muligt at give plads til grundige forskningsbaserede undersøgelser, der ofte kræver længere tid end traditionelle rådgivningsundersøgelser.

For at opnå et optimalt udbytte af forskningssamarbejdet for begge parter kræves at:

- Projektet skal gennemføres i tæt samarbejde mellem VD og forskningspartneren. VD skal i den forbindelse allokere tilstrækkelige interne ressourcer til at følge og levere aktiv sparring med forskningsaktiviteterne. Forskningspartneren skal respektere VD's krav om relevans i valget af forskningsaktiviteter.
- Resultaterne skal løbende formidles, både internt i VD og eksternt i faglige netværk.

6. Publikationer fra projektet

Journal artikler

- /J-1/ He X, Lucatero D, Ridler ME, Madsen H, Kidmose J, Hole Ø, Petersen C, Zheng C, Refsgaard JC (2019). *Real-time simulation of surface water and groundwater with data assimilation*. *Advances in Water Resources*, 127, 13-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.004>
- /J-2/ Jakobsen PR, Rasmussen ES, Dybkjær K & Kidmose J (2016). *Miocene deposits at Silkeborg, Jylland, and their influence on hydrology*. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 35, p9-12. Open access: https://eng.geus.dk/media/10848/nr35_p09-12.pdf
- /J-3/ Kidmose J, Refsgaard JC, Troldborg L, Seaby LP & Escriva MM (2013). *Climate change impact on groundwater levels: ensemble modelling of extreme values*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, p1619-1634. Open access: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/1619/2013/>
- /J-4/ Kidmose J, Troldborg L, Refsgaard JC & Bischoff N (2015). *Coupling of a distributed hydrological model with an urban storm water model for impact analysis of forced infiltration*. *Journal of Hydrology* 525, p506-520. Weblink: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415002565>
- /J-5/ Kidmose J, Troldborg L & Refsgaard JC (submitted to *Groundwater*, November 2019). *Ground water model predictions under changing conditions - a post audit*.
- /J-6/ Randall MT, Troldborg L, Refsgaard JC & Kidmose J (2013). *Assessing urban groundwater table response to climate change and increased stormwater infiltration*. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 28, p33-36. Open access: https://eng.geus.dk/media/10927/nr28_p33-36.pdf
- /J-7/ Troldborg L, Ondracek M, Koch J, Kidmose J & Refsgaard JC (submitted to *Geological Engineering*, October 2019). *Quantifying stratigraphic uncertainty in groundwater modelling for infrastructure design*.

Populærvidenskabelige artikler

- /P-1/ Refsgaard JC, Hole Ø, Ridler M, Lucatero D, Petersen C, He X, Troldborg L, Kidmose J & Madsen H (2017). *Real-tids varsling af grundvand og afstrømning ved motorvejen i Silkeborg*. Vand og Jord. 2-2017. Weblink: <http://www.vand-og-jord.dk/vj217.htm>
- /P-2/ Troldborg L, Boesen M, Jørgensen A, Kidmose J & Refsgaard JC (2017). *Klimatilpasning - mulighed og faldgrube*. Vand og Jord. 2-2017. Weblink: <http://www.vand-og-jord.dk/vj217.htm>
- /P-3/ Troldborg L, Kidmose J, Refsgaard JC, Boesen M, Jørgensen A (2016). *Grundvand på motorvejen? Er der behov for klimasikring af veje? Eksempel fra motorvejen gennem Silkeborg*. Trafik & Veje 2016 september. Weblink: https://issuu.com/trafikog-veje/docs/togv_sep_2016_qwfx_for_abonnenter/10

Konferencebidrag med abstrakt:

- /K-1/ Kidmose J, Troldborg L & Refsgaard JC (2019). *Post-audit of a hydrological model: Evolution of predictive uncertainty in a 9 year modelling exercise*. EGU General assembly 2019 HS1.2.11, Vienna. Weblink: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-17091.pdf>
- /K-2/ Kidmose J, Troldborg L, Refsgaard JC & Seaby LP (2011). *Effects of future climate change on groundwater levels at a sub-groundwater table motorway construction in Denmark*. GSA annual meeting 2011, Minisota. Weblink: <https://gsa.confex.com/gsa/2011AM/webprogram/Paper191324.html>
- /K-3/ Ondracek M, Troldborg L, Koch J, Kidmose J, Refsgaard JC (2019). *Comprehensive analysis of multiple sources of uncertainties in an integrated hydrological model focusing on simulated groundwater levels*. EGU General assembly 2019 HS1.2.11, Vienna. Weblink: <http://mosikt.dk/grafik/comprehensive-analysis-poster.jpg>

Videnskabelige rapporter:

- /R-1/ Jakobsen PR, Kidmose J & Rasmussen ES (2014). *Geologien i motorvejsstrækningen ved Silkeborg - Profilbeskrivelser og opdatering af geologisk model fase 2*. GEUS Rapport 2014/77
- /R-2/ Rasmussen P, Troldborg L & Wiese MB (2015). *Forslag til fremtidigt grundvandspejlestationsnet for motorvejsstrækning gennem Silkeborg*. GEUS Rapport 2015/80
- /R-3/ Troldborg L, Refsgaard JC, Kidmose J & Randall M (2013). *Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg - Statusrapport fase 1.3*. GEUS Rapport 2013/43
- /R-4/ Troldborg L, Refsgaard JC, Kidmose J, Escrivà MM & Nyegaard P (2011). *Grundvandsmodel for motorvejs-strækning gennem Silkeborg - Statusrapport fase 1.1 og 1.2*. GEUS Rapport 2011/136