

Grundvandsstigninger og dræning af veje

Simuleringer af vandstrømninger i en vejkonstruktion, beliggende i et område med højt grundvandsspejl, viser at vejens drænsystem belastes signifikant kraftigere ved de grundvandsniveauer der forudses i fremtiden. Samtidigt viser beregninger at vandindholdet i vejens ubundne lag øges med deraf følgende konsekvenser for vejens holdbarhed.

MIKKEL MOLLERUP

Forventede grundvandsstigninger og effekt

I 1/ ses det at en betydelig del af Danmarks areal allerede nu ligger i områder med højt grundvandsspejl. Således er middel grundvandsstanden i Danmark for godt 40 % af arealet på 1 m eller derunder mens det for 20 % af landet ligger mellem 1 og 3 meter. Baseret på beregninger med klimamodeller og hydrologiske modeller er det fundet at et sandsynligt udfald af klimaændringerne, er at grundvandsspejlet stiger for 99 % af arealet, hvoraf stigningerne er på 0-0,50 m for 67 % af det samlede areal. De resterende 32 % har altså mere udtalte stigninger.

I 2/ (uddrag i 3/) blev der foretaget beregninger af en udrænet vejkonstruktion, udsat for forskellige niveauer af et stationært beliggende grundvandsspejl. Det blev fundet at selv mindre ændringer i grundvandsspejlet havde signifikant betydning for levetiden.

For at se på vandindholdet i en drænet vejkonstruktion præsenteres her simuleringer af vandbevægelserne i en vejkonstruktion, beliggende i et område med terrænnært grundvand, hvor grundvandsspejlet har en årlig svingning.

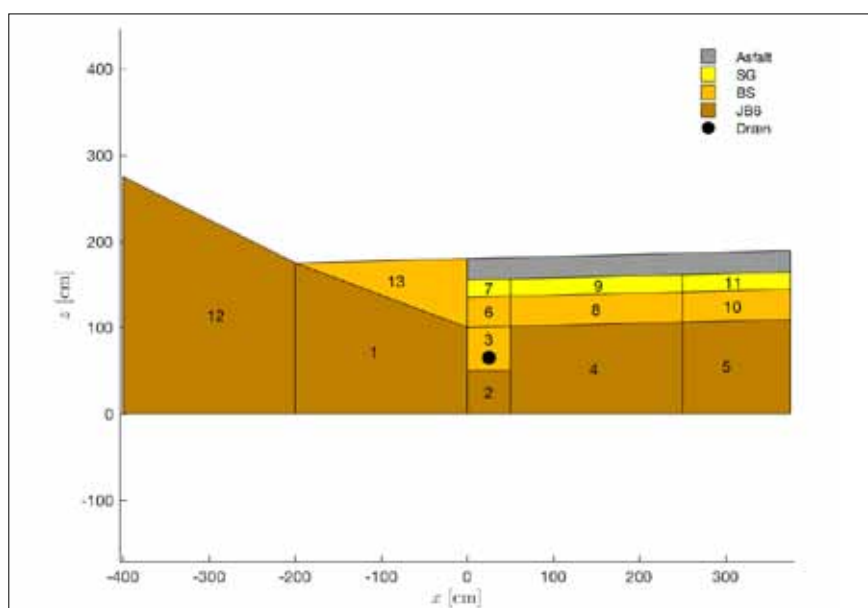
Vejgeometri

På Figur 1 ses et tværsnit af vejkonstruktionen,

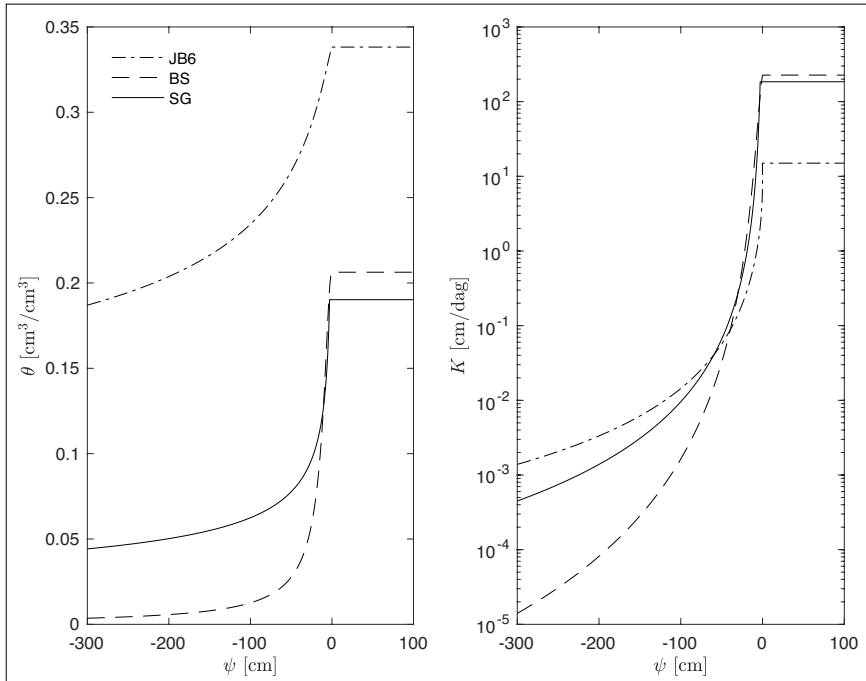
og de nærmeste omgivelser der simuleres. Det forudsættes her at vejen er symmetrisk omkring midterlinjen, således at det kun er nødvendigt at simulere halvdelen af vejen. Vejen er af hensyn til materialegrænser og efterbehandling af simuleringresultater opdelt i en række områder (subdomæner) som numrene angiver.

I den simulerede vejkonstruktion er asfaltlaget 25 cm tykt, laget med stabilt grus er på 20 cm og endelig er tykkelsen af bundsikringslaget på 35 cm. Kørespor og kantbane har en

bredde på henholdsvis 50 og 325 cm, mens yderrabatten er 200 cm bred med anlæg 2. Nedre rand i området der simuleres har kote 0, og jordlaget er umiddelbart til venstre for asfaltkanten 1 m dybt. Overfladelaget i skrænten (område 13 på Figur 1) og materialet i drængrøften (område 3) er for simpelhedens skyld specificeret som stabilt grus. Den omgivne jord er klassificeret som en JB6, dvs. en fin sandblandet lerjord. Således indgår der i modellen tre forskellige typer porøse materialer.



Figur 1. Vejkonstruktionens opbygning og det simulerede område. Vejen er opdelt i en række områder (subdomæner) som numrene angiver. SG angiver stabilt grus, BS bundsikringsmateriale og JB6 er en fin sandblandet lerjord.



Figur 2. Estimerede hydrauliske egenskaber (retention og ledningsevne) for stabilt grus (SG) og bundsikkeringen (BS). Der sammenlignes med jordbundsmaterialet (JB6-jorden)

Teori og materialeegenskaber

Vandbevægelserne i variabelt mættede medier kan beskrives med Richards ligning (se Boks 1). Ved løsning af ligningen bestemmes trykpotentialet, Ψ , der er forskellen mellem porvandsstryk og det atmosfæriske tryk. Potentialet angives typisk i cm vandsøjle (energi pr. volumenenhed). Ved grundvandsspejlet er trykpotentialet 0 svarende til atmosfærisk tryk.

Materialernes retentionsegenskaber beskriver sammenhængen mellem Ψ og vandindholdet, θ og skal sammen med materialernes hydrauliske ledningsevne kendes for løsning

af Richards ligning. Retentions- og ledningsevneegenskaberne for materialerne er her bestemt ud fra kornkurver og antagelser om komprimeringsgrad under anvendelse af teorien beskrevet i /6, 7, 8/ - se /2/ for de konkrete materialer. De hydrauliske egenskaber for JB6'en er beskrevet i /9/. På Figur 2 vises de fundne retentions- og ledningsevneegenskaber. Det ses tydeligt at stabilt grus og bundsikkeringsmateriale opfører sig markant anderledes end JB6'en i hydraulisk henseende.

Drænet simuleres som et ideelt dræn med rigelig kapacitet, dvs. at der ikke forekommer mættede forhold lige over drænet, ligesom at

drænet ikke afgiver vand til vejkonstruktionen.

For at løse Richards ligning for en vejkonstruktion er det nødvendigt at benytte numeriske metoder. Konkret benyttes FEM (se Boks 2).

Grundvandsstigninger

Typisk svinger grundvandsstanden med tiden. Ofte er der mindre højfrekvente svingninger i forbindelse med enkelte regnvejrshændelser, men også en årlig større svingning hvor grundvandsstanden når sit maksimum i vinterhalvåret hvor nettonedbøren (nedbør - fordamning) er høj, se evt. /9/. For at simulere denne svingning sættes trykket i nedre rand til at variere som en sinuskurve med en periode på 1 år. Amplitudens sættes til 50 cm, svarende til en forskel på 1 m mellem høj og lav grundvandsstand i løbet af året. Der regnes på 2 scenarier: et med lavt niveau for grundvandsspejlet hvor det til tiden 0 ligger i kote 0 eller ca. 1,55 m under belægningen i venstre side og et med højt niveau hvor grundvandsspejlet til tiden 0 ligger 1,20 m under belægningen i venstre side. På Figur 3 ses trykket på nederste rand for de 2 scenarier.

De øvrige ydre rande tildeles en no-flux betingelse, dvs. at der hverken nedsiver eller fordamper vand.

Simuleringsresultater

På Figur 4 ses vandindholdet i vejkonstruktionen og den omkringliggende jord til 6 forskellige tidspunkter. Trykket i nedre rand har maksimum mellem dag 182 og 183. Det ses da også tydeligt, at der er betydeligt større vandindhold i de udbundne lag op til tidspunktet end ellers. Samtidigt kan sænkningstrakten omkring drænet observeres. Ikke overrask-

Boks 1: Richards ligning

Umættede vandstrømninger i jord frembringes af tyngdekrafter og kapillære kræfter, og kan beskrives med Richards ligning der er en sammensætning af Buckingham-Darcys lov og kontinuitetsligningen (massebevarelse). For isotrope medier (vandet strømmer lige nemt i alle retninger) lyder Richards ligning:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\psi) \nabla (\psi + z)) - \Gamma_w$$

hvor θ er det volumetriske vandindhold, ψ er trykpotentialet i jorden. $K(\psi)$ er den hydrauliske ledningsevne og Γ_w er et drænled. Drænledet kan inkludere tab til drænledninger, men også rodoftag (fx for grøfter). z -aksen er positiv opad. Det bemærkes at ligningen indeholder to ubekendte, θ og ψ , som dog i praksis koges ned til én idet materialernes retentionskurver beskriver sammenhængen mellem de to størrelser. Både retentionsegenskaberne og ledningsevnen afhænger af materialet, herunder poregeometrien der igen bl.a. afhænger af materialets kornkurve og komprimeringsgraden.

Richards ligning er en såkaldt ikke-lineær partiel differentialligning. For at løse ligningen skal man specificere initial- og randbetingelser. Randbetingelserne beskrives ved en kombination af ψ og dens afledte på randen, og beskriver hvordan det simulerede område interagerer med det omgivende miljø. I hydrologi benyttes oftest randbetingelserne af typerne Dirichlet (angivelse af trykpotentiale) og Neumann (angivelse af flux gennem randen).

Kun for særlige tilfælde findes der analytiske eller quasi-analytiske løsninger til Richards ligning, eksempler herpå er /4,5/. For hovedparten af praktiske problemstillinger (så som 2D eller 3D strømninger i vejkonstruktioner) må man ty til numeriske løsninger. En ofte anvendt numerisk metode er FEM (Finite Element Method).

ende har den omkringliggende JB6-jord til alle tider et signifikant højere vandindhold end i vejkonstruktionens ubundne lag. Dette kan forklares med den højere porøsitet og ikke mindst JB6'ens store antal fine porer der pga. de kapillære kræfter holder på vandet

Drænaflow

På Figur 5 vises den simulerede drænaflow for de 2 scenarier. Det ses at den maksimale drænaflow er vokset fra 0,13 til 0,31 m²/dag. Tilsvarende er perioden hvor drænen er aktive udvidet betragteligt. Den totale afdrænedede mængde, svarende til arealet under kurverne er på 12,1 m² for nutidigt (lavt) grundvandspejl og 40,8 m² for fremtidigt (højt), altså en stigning på over 200 %.

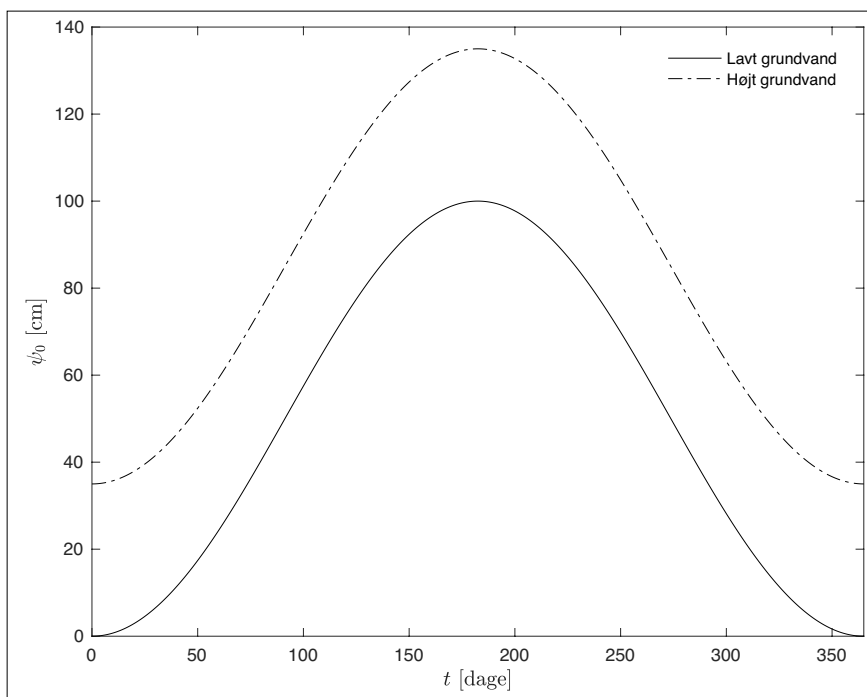
Vandindhold i vejens ubundne lag

Vejens holdbarhed afhænger i høj grad af styrkeegenskaberne i de ubundne lag under befæstelsen. Der ses her på vandindholdet i områderne (se Figur 1) 7, 9, 11 med stabilt grus og områderne 6, 8, 10 med bundsikring - altså de ubundne lag der ligger ned til 55 cm under asfalten. Området omkring drænen (domæne 3) og uden for kørebanen (område 13) er altså ikke inkluderet her. På Figur 6 vises det gennemsnitlige volumetriske vandindhold i områderne for de 2 scenarier henover året. Det ses at vandindholdet i bundsikringslaget svinger betydeligt mere end vandindholdet i laget med stabilt grus. Det kan også ses at vandindholdene i de 2 lag på dag 365 er en anelse højere end ved dag 0, hvilket er et udtryk for at afdræningen er en langsom proces og der ikke nås helt tilbage til ligevægtssituationen (med hydrostatisk trykfordeling). Sammenlignes de to scenarier ses at vandindholdene i de ubundne lag er betydeligt større for høj grundvandsstand end for lav. For bundsikringslaget når vandindholdet næsten op på 0,15 der er tæt på det mættede vandindhold (porøsitet) på 0,206.

Diskussion og konklusion

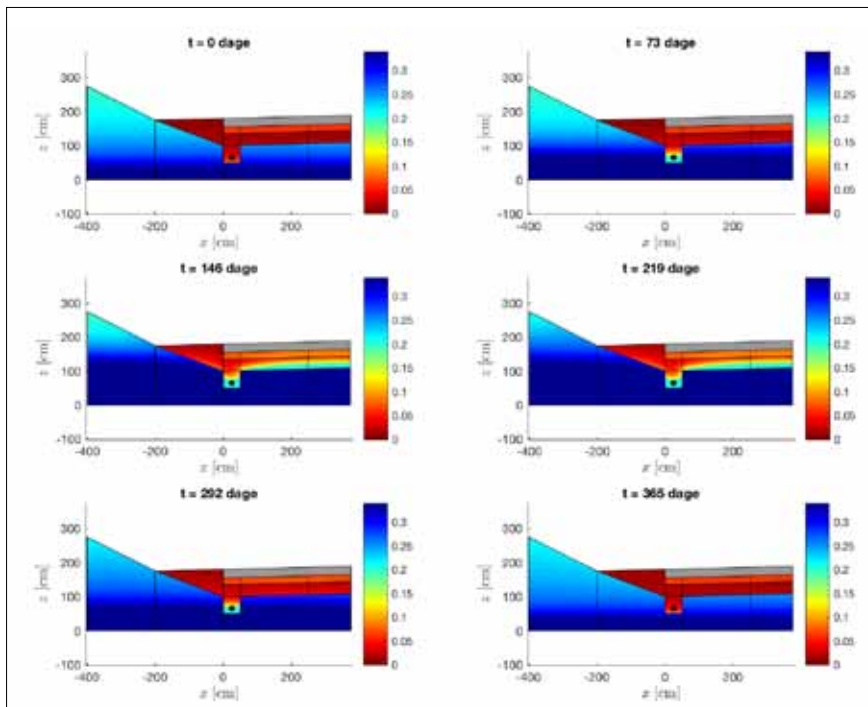
Der er her præsenteret simuleringsresultater for en vej der ligger i område med højt grundvandspejl. Beregningerne viser at selv mindre stigninger i det gennemsnitlige niveau for grundvandspejlet medfører signifikant højere drænaflow.

Da materialernes e-moduler typisk falder med vandindholdet, vil det bevirke at vejens styrkeegenskaber forringes med lavere levetid som følge. På trods af vejens drænsystem viser beregningerne at niveauet for vandindholdet i vejens ubundne lag øges betydeligt til skade for levetiden.



Figur 3. Påsat trykpotentiale hen over året ved nedre rand, svarende til grundvandsniveauet ved ligevægt og uden dræn. Der foretages simuleringer for et lavt (nutidigt) og et højt (fremtidigt) beliggende grundvandspejl.





Figur 4. Volumetrisk vandindhold i vejkonstruktionen til forskellige tider.

Referencer

/1/ Henriksen, H. J., Højberg, A. L., Olsen, M., Seaby, L. P., van der Keur, P., Stisen, S., Troldborg, L., Sonnenborg, T. O. og Refsgaard, J. C. (2012). Klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Klimagrundvandskort). Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelser Rapport 2012/116. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland.

/2/ Møllerup, M. og Rohde T. (2016). Grundvandsstigningers påvirkning af vejes bæreevne. Rapport nr. 562 Vejdirektoratet.

/3/ Møllerup, M. og Henriksen, H. J. (2016). Grundvandsstigningers og ændrede vejlevetider. Trafik og Veje (September).

/4/ Møllerup, M. (2007). Philip's infiltration equation for variable-head ponded infiltration. Journal of Hydrology., 347, 173–176.

/5/ Møllerup, M. og Hansen, S. (2007). Power series solution for falling-head ponded infiltration. Water

Resources. Research, 43.

/6/ Arya, L. M. og Paris, J. F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. Soil Science Society of America Journal, 45, 1023–1030.

/7/ Arya, L. M., Leij, F. J., Shouse, P. J., og van Genuchten, M. T. (1999a). Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. Soil Science Society of America Journal, 63, 1063–1070.

/8/ Arya, L. M., Leij, F. J., van Genuchten, M. T., og Shouse, P. J. (1999b). Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. Soil Science Society of America Journal, 63, 510–519.

/9/ Møllerup, M., Abrahamsen, P., Petersen, C.T. og Hansen, S. (2014). Comparison of simulated water, nitrate, and bromide transport using a Hooghoudt-based and a dynamic drainage model. Water Re-

Boks 2: FEM (Finite Element Method)

FEM er en numerisk metode til at løse partielle differentialligninger (PDE'er). PDE'er forekommer inden for en lang række områder inden for fysikken og ingeniørvidenskaberne, men også mere eksotiske områder som prisdagsværdier af call- og put-optioner (Black-Scholes ligningen).

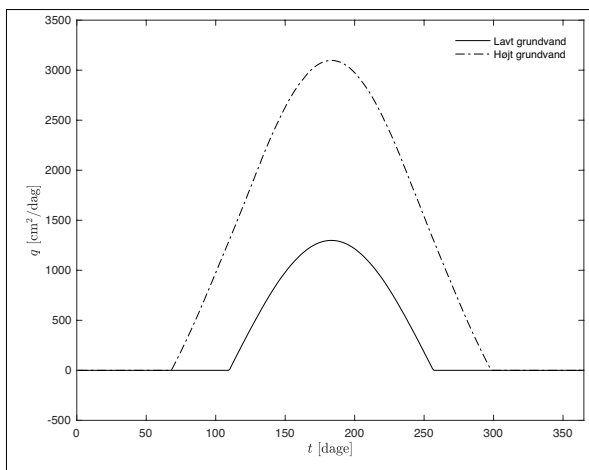
Det matematiske grundlag for FEM er ganske kompliceret, og der findes en lang række variationer. En grundlæggende idé er dog at domænet (området der skal simuleres) deles op i mindre områder, kaldet elementer (aktuelt trekantede) hvor løsningen approksimeres med simple algebraiske ligninger. Derefter samles bidragene fra de enkelte elementer og det samlede problem løses. FEM muliggør simulering af komplekse geometrier med delområder (subdomæner) med forskellige karakteristika - her hydrauliske egenskaber for de forskellige typer ubundne materialer. Konkret er der i beregningerne benyttet net med godt 12.000 elementer af varierende størrelse.

Der er muligt at læse mere om den anvendte FEM-model i /10/.

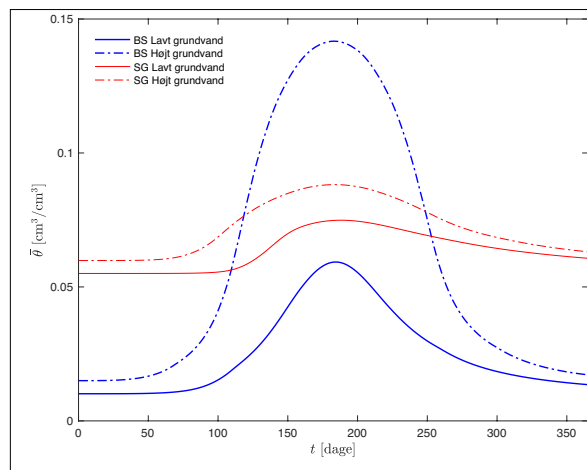
sources Research., 50, 1080-1094.

/10/ Møllerup, M. (2001). Numerical Modelling of water and solute movement in tilled topsoil. Ph.D. thesis, Royal Veterinary and Agricultural University, Laboratory for Agrohydrology and Bioclimatology, Department of Agricultural Sciences, Denmark.

MIKKEL MØLLERUP, Vejdirektoratet, quantitative analyst. mikkell.mollerup@gmail.com



Figur 5. Drænastrømning for scenarier med lavt og højt grundvandsspejl.



Figur 6. Vandindhold over året i lag med stabilt grus og i bundsikringslaget (område 6, 8 og 10 på Figur 1).