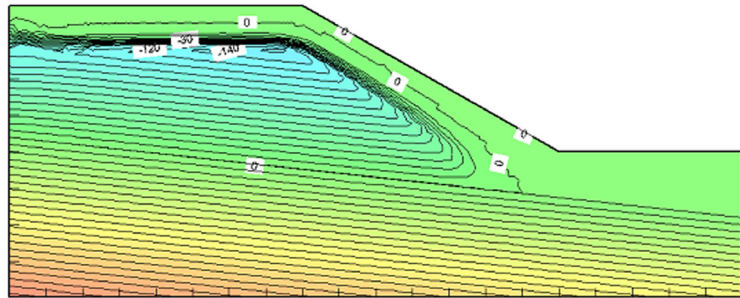




LUND
UNIVERSITY



UTVÄRDERING AV PROGRAMVAROR FÖR NUMERISK SIMULERING AV NEGATIVA PORTRYCK

ANNA PALM

Geotechnical
Engineering

Master's Dissertation

Department of Construction Sciences
Geotechnical Engineering

ISRN LUTVDG/TVGT--11/5043--SE (1-72)
ISSN 0281-6679

UTVÄRDERING AV
PROGRAMVAROR FÖR
NUMERISK SIMULERING AV
NEGATIVA PORTRYCK

Master's Dissertation by

ANNA PALM

Supervisors
Rebecca Bertilsson,
Statens Geotekniska Institut (SGI), Linköping

Ola Dahlblom, Professor,
Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund

Examiner:
Per Johan Gustafsson, Professor
Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund

Copyright © 2011 by Geotechnical Engineering, LTH, Sweden.
Printed by Media-Tryck LU, Lund, Sweden, September, 2011 (P).

For information, address:
Geotechnical Engineering, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
Homepage: <http://www.byggvetenskaper.lth.se/geoteknik>

Förord

Det här examensarbetet kom till på initiativ av Statens Geotekniska institut (SGI) som sökte alternativa programvaror för simulering av negativa portryck. Arbetet har utförts på SGI:s kontor i Göteborg.

Jag vill börja med att tacka mina handledare Ola Dahlblom och Rebecca Bertilsson för deras hjälp och framförallt deras stora tålamod med det här arbetet.

Jag vill också tacka datorsupporten på SGI för deras hjälp med installation av programvaror.

Sist vill jag tacka min kära mor, Margareta Sjövall, för hennes värdefulla stöd och helt enastående hjälp vilken jag inte hade klarat mig utan.

Anna Palm,
Göteborg, juni 2011.

Abstract

Pore water pressure is defined relative to atmospheric pressure and it is zero kPa at the water table. Under the water table the pore water pressure rises linearly at a hydrostatic pressure distribution and above the water table it sinks. How the pore water pressure profile above the groundwater table develops in practice depends on the soil water content. The relationship between water content and pore pressure is not linear. It is described by a water content curve (wcc) or water retention curve. There are several different models to mathematically describe the water retention curve. Two of the most common models are developed by van Genuchten (1980) and Fredlund and Xing (1994).

There are a variety of software programs that can perform simulations of ground water motions. However, there are relatively few software programs that perform calculations of water flow above the water table. An inventory has been done here which lists nine software packages that can simulate water flow in unsaturated soils.

In this report three software products, which can simulate negative pore pressure, i.e. perform calculations of water flow in unsaturated soils, have been evaluated and compared. The three software products are SEEP/W (Geostudio), SvFlux (Soilvision) and MidasGTS (MidasIT).

The evaluation has been done by designing and calculating the same models in the various programs. The models were constructed as similar as possible in order to compare results and to see the options available to design specific problems in the various programs. Three of the models used are reconstructions of examples presented by Geostudio. A parametric study has also been made for a model used by Rebecca Bertilsson in a previous parametric study (Bertilsson 2010).

Attempts have been made to set up and calculate examples in Midas GTS in the same way which has been done in SEEP/W and SvFlux. Working with Midas GTS has been problematic. Midas GTS showed to be difficult to use for calculations of negative pore water pressure. Solutions have not been presented to the same models constructed in SEEP/W and SvFlux and Midas GTS has subsequently not been covered in the comparison of the programs.

The main difference between SvFlux and SEEP/W is the way to construct the FEM mesh. SvFlux is designed with adaptive meshing which automatically changes the mesh as the solution progresses.

SEEP/W and SvFlux have shown similar results. Differences in the results usually could be related to differences in meshing and time stepping.

Of the two software's SEEP/W and SvFlux, SEEP/W have been perceived as a more convenient tool for numerical analysis of negative pore water pressures

Sammanfattning

Portryck definieras i förhållande till atmosfärstrycket, det är noll kPa vid grundvattenytan. Under grundvattenytan stiger trycket linjärt vid en hydrostatisk tryckfördelning och ovan sjunker det. Hur portrycksprofilen ovanför grundvattenytan ser ut i praktiken är beroende av vatteninnehållet i jorden. Sambandet mellan vatteninnehåll och portryck är inte linjärt. Det beskrivs av vattenretentionskurvan, även kallad pF-kurva. Det finns flera olika modeller för att matematiskt beskriva vattenretentionskurvan. Två av de vanligaste är framtagna av van Genuchten (1980) och Fredlund och Xing (1994).

Det finns en mängd programvaror som kan utföra simuleringar av grundvattenrörelser. Däremot finns det relativt få programvaror som utför beräkningar av vattenflöde ovanför grundvattenytan. En inventering har gjorts här vilken listar nio programvaror som kan simulera vattenflöden för omättad jord.

I den här rapporten har tre programvaror utvärderats och jämförts som kan simulera negativa portryck, dvs. utföra beräkningar av vattenflöden i omättad jord. De tre programvarorna är SEEP/W (Geostudio), SvFlux (Soilvision) och MidasGTS (MidasIT).

Utvärderingen har gått till så att samma modeller har konstruerats och beräknats i de olika programmen. Modellerna har gjorts så lika som det varit möjligt för att kunna jämföra resultat och för att se vilka möjligheter det finns att konstruera specifika problem i de olika programmen. Tre av de modeller som använts är rekonstruktioner av exempel presenterade av Geostudio. En parameterstudie har också gjorts för en modell som använts av Rebecca Bertilsson i en tidigare parameterstudie (Bertilsson 2010).

Försök har gjorts att ställa upp och beräkna samma exempel i Midas GTS som i SEEP/W och SvFlux. Arbetet med Midas GTS har upplevts som problematiskt då programmet varit svårt att använda för beräkningar av negativa portryck. Lösningar har inte kunnat presenteras för de modeller som konstruerats i SEEP/W och SvFlux och Midas GTS har därefter inte varit med i den övriga jämförelsen av programmen.

Det som främst skiljer SvFlux och SEEP/W åt är sättet att konstruera FEM-nätet. SvFlux är konstruerat med *adaptive meshing* (anpassat nät) vilket automatiskt förändrar nätet allt eftersom lösningen fortskrider.

SEEP/W och SvFlux har uppvisat likvärdiga resultat vid jämförelse. Skillnader i resultaten har oftast kunnat härröras till de olika konstruktionerna av nät och tidssteg.

Av de två programvarorna SEEP/W och SvFlux har SEEP/W uppfattats som ett mer lättanvänt arbetsverktyg för numerisk analys av negativa portryck

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
2	Materialet jord.....	3
2.1	Kohesions- och friktionsjordarter	3
2.2	Materialet silt.....	3
3	Vatteninnehåll i jord.....	5
3.1	Vattnets olika former i jord	5
3.2	Zonindelning av en jordprofil.....	6
3.3	Portryck	7
3.4	Kapillaritet.....	8
3.5	Vattenretentionskurvan.....	9
3.6	Beskrivning av vattenretentionskurvan	12
3.6.1	Brook och Corey (1964).....	12
3.6.2	van Genuchten (1980).....	13
3.6.3	Fredlund och Xing (1994).....	14
4	Introduktion till simulering av omättad jord	15
4.1	Grundläggande ekvationer.....	15
4.2	FEM-nät	16
4.3	Visualisering av resultaten.....	17
4.4	Konvergens.....	17
5	Programvaror	19
5.1	Inventering av programvaror	19
5.2	Val av programvaror.....	21
5.3	Presentation av programvaror.....	22
5.3.1	SEEP/W	22
5.3.2	SvFlux	26
5.3.3	Jämförelse SEEP/W och SvFlux	30
5.3.4	Midas GTS	31
6	Utförda simuleringar	33
6.1	Sandbox.....	33
6.1.2	Simulering med SEEP/W	34
6.1.3	Simulering med SvFlux.....	35
6.1.4	Diskussion.....	36
6.2	Reservoar.....	37
6.2.1	Geometri	37

6.2.2	Materialegenskaper	37
6.2.3	Randvillkor.....	39
6.2.4	Tidssteg.....	39
6.2.5	Simulering med SEEP/W.....	40
6.2.6	Simulering med SvFlux.....	41
6.2.7	Diskussion.....	42
6.3	Pond infiltration.....	43
6.3.1	Geometri	43
6.3.2	Materialegenskaper	43
6.3.3	Randvillkor.....	45
6.3.4	Simulering med SEEP/W.....	46
6.3.5	Simulering med SvFlux.....	47
6.3.6	Diskussion.....	47
6.4	Parameterstudie	48
6.4.1	Geometri	48
6.4.2	Materialegenskaper	48
6.4.3	Randvillkor.....	49
6.4.4	Simulering med SEEP/W.....	49
6.4.5	Simulering med SvFlux.....	50
6.4.6	Resultat för SEEP/W och SvFlux.....	52
6.4.7	Diskussion.....	56
7	Utvärdering	57
7.1	Möjligheter och begränsningar vid simulering.....	57
7.1.1	Geometri	57
7.1.2	Randvillkor.....	57
7.1.3	Materialegenskaper	57
7.1.4	Beräkningstider	58
7.1.5	Import/export	58
7.1.6	Rapportering.....	58
7.1.7	Visualisering	58
7.1.8	Problem i SvFlux.....	59
7.2	Användarvänlighet	59
7.2.1	SEEP/W	59
7.2.2	SvFlux.....	60
7.3	Utvärdering av Midas GTS.....	60
8	Slutsats	63
8.1	Rekommendationer.....	63
8.2	Framtida arbete.....	63
9	Referenser	65

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Det är allmänt känt att släntstabilitet i hög grad påverkas av jordens vatteninnehåll, särskilt för jordar med siltigt innehåll. Siltiga jordar har hög kapillär stighöjd och stora negativa portryck kan utvecklas i den här typen av jord. Effekten av negativa portryck tas dock sällan hänsyn till i dagens stabilitetsberäkningar. Det anses för osäkert, med risken för att förändringar i vattenmängd ska orsaka sänkning av hållfastheten. Möjligheten att med hjälp av numerisk analys studera vatteninnehållets påverkan på portrycksprofilen har visat att det finns skäl att omvärdera synen på negativa portryck.

Frågeställningar rörande negativa portryck har aktualiserats bland annat genom det fokus i samhället som i dagsläget finns på effekter av klimatförändringar. Förändrade hydrologiska förhållanden som ökad nederbörds mängd kan bidra till att det negativa portrycket minskar eller försvinner helt vilket i sin tur leder till försämrad släntstabilitet.

Ur detta har ett behov av att undersöka vilka programvaror som finns tillgängliga och hur väl dessa fungerar som arbetsverktyg vid beräkningar av negativa portryck identifierats.

1.2 Syfte

Syftet med det här examensarbetet är att göra en undersökning av marknaden för programvaror som kan simulera negativa portryck och utföra stabilitetsberäkningar med dessa samt en utvärdering och jämförelse av ett par sådana programvaror.

Utvärderingen och jämförelsen av programvarorna har gjorts med avseende på följande kriterier:

- Möjligheter och begränsningar för simuleringarna
- Användarvänlighet
- Support

Simuleringarna har gjorts på teoretiska modeller och någon utvärdering av vilka resultat som ligger närmast verkligheten har inte ingått i detta arbete. Som referensprogram har SEEP/W använts.

SEEP/W är ett program som är mycket använt för numeriska simuleringar av negativa portryck internationellt. Det är också ett av de program som Rebecca Bertilsson använts för simuleringar som utförts vid SGI med den konceptuella modell som kommer användas här (Bertilsson 2010). Resultaten kan därför jämföras med tidigare beräkningar från SGI.

För den som ska utföra beräkningar och simuleringar som inte finns i arbetsrutinerna sedan tidigare blir användarvänligheten av stor vikt. Att simuleringarna görs i ett tydligt gränssnitt som är lätt att förstå och att support finns tillgänglig underlättar betydligt. Användarvänligheten har därför utvärderats för de olika programmen.

2 Materialet jord

Jord är ett trefasmaterial bestående av jordpartiklar (fast fas), vatten (flytande fas) och luft (gasfas). Mellan jordpartiklarna finns större och mindre hålrum som kan vara helt eller delvis fyllda med luft eller vatten. Tillsammans bildar faserna en jordmassa.

2.1 Kohesions- och friktionsjordarter

Materialet jord kan delas in i två huvudkategorier med avseende på bland annat vattenhållande förmåga och stabilitetsegenskaper: friktionsjordar och kohesionsjordar. Till friktionsjordar hör jordfraktionerna block, sten, grus och sand. De kännetecknas av låg vattenhållande förmåga och att stabiliteten utgörs av de sammanhållande friktionskrafterna i kornskelettet då jorden utsätts för tryck. Till kohesionsjordarterna hör jordfraktionen lera och de organiska jordarterna. De har hög vattenhållande förmåga och vid vattenmättnad stabiliseras de av sammanhållande kohesionskrafter mellan partiklarna. Silt klassas som en mellanjordart som beroende av kornstorlekssammansättning kan fungera både som en friktionsjordart och en kohesionsjordart.

2.2 Materialet silt

Silt är en jordart som finns i stort sett i hela Sverige. Definierat utifrån kornstorlek är siltfraktionen 0.002-0.06 mm vilken kan delas in i tre delfraktioner: *finsilt*, 0.002 – 0.006 mm, *mellansilt*, 0.006 – 0.02 mm och *grovsilt* 0.02 – 0.06 mm.

Flera skäl ligger till grund för valet av kornstorleksgränserna mot lera respektive sand.

Lera och silt skiljs vid 0.002 mm eftersom lerans plastiska egenskaper tydligt avtar här. Lermineral som bygger upp lerpartiklar bygger ofta inte större partiklar än 0,005 mm vilket motsvarar jordfraktionen finsilt. Gränsen markerar därför med viss överlappning en skillnad i mineralstruktur. Det är lermineralens bidrag till siltfraktionen som ger den mycket av dess vattenhållande förmåga. Skillnaden i permeabilitet är stor mellan silt och lera och de skiljs därför åt av materialets benägenhet för tjälning. Silt är ytterst tjälfarligt medan lera har lägre permeabilitet och är därför inte lika benäget för tjälning.

Sand och silt skiljs åt av deras tjälningbenägenhet, sand har hög permeabilitet och sämre kapillär stigförmåga vilket medför lägre risk för tjälning. Silt har lägre permeabilitet samt högre kapillär stigförmåga vilket gör materialet mycket tjälningbenäget. Fraktionsgränsen till sand markerar också gränsen där materialet tappar sina egenskaper som flytjord. Vid gränsen 0.06 mm börjar kornen bli så stora att de går att urskilja med blotta ögat. (Larsson, 1995)

Silt bildas främst som kross och vittringsmaterial. Vanligt i Sverige är att silt bildats som bottenmorän, ofta från kalkstensrika områden. Siltmorän är Sveriges vanligaste morän. (Knutsson m fl, 1998). Förutom som en beståndsdel i morän bildas silt även som sedimentationsmaterial vilket kan vara avlagringar bildade under isavsmältningen; glacial silt, eller av rinnande vatten efter den senaste istiden; postglacial silt. Ren glacial silt är oftast resultatet av sedimentation i lugna miljöer där den varvas med lera. I de stora älvdalarna i Norrland, norra Svealand och på Småländska höglandet bildades under isavsmältningen lugna varaktiga sedimentationsmiljöer, liknande fjordar. Här har stora mängder glacial silt avsatts, vanligen kallade fjordsediment. Dessa avsättningar har sedan byggts på under postglacial tid

av rinnande vatten så att det idag finns tjocka avlagringar av silt längs älvdalarna och i deltan ute vid kusten. (Larsson, 1995)

Nipor och raviner är karakteristiska formationer i dessa landskap. Nipor utgör höga branta slänter medan raviner är mindre och v-formade. Förutsättningarna för dessa formationer är att silt har möjlighet till att bilda en brant rasvinkel vid rätt vattenmättnad. (Knutsson m fl, 1998)

Beroende på om sedimentär silt avsatts över eller under högsta kustlinjen blir den olika välsorterad. Avsättning på land ger inte samma graderingsmöjlighet som sedimentation i vattenmiljö gör (Larsson, 1995). Silt brukar klassificeras som ensgraderad eller månggraderad beroende på om variationen i kornstorlek är liten (ensgraderad) eller stor (månggraderad).

Då de fina materialen silt och ler ofta påträffas tillsammans markeras de på många geologiska kartor som en jordart trots sina olikheter i egenskaper. (Knutsson m fl, 1998)

3 Vatteninnehåll i jord

Där jorden är omättad är alla tre faserna aktiva och påverkar dess egenskaper. Förhållandet mellan luft och vatten i den omättade jorden kan beskrivas i tre steg enligt Bear (1979).

1. Vid låg vattenhalt finns vattnet som en film runt jordpartiklarna. Vattenfasen är inte kontinuerlig.
2. Vid högre vattenhalt är både vattenfasen och luftfasen kontinuerliga.
3. Nära mättnad är vattenfasen kontinuerlig och luften finns splittrad i bubblor.

Tre vanliga sätt att beskriva vattenhalten i jord är med dess vattenmättnadsgrad, volymetriska vatteninnehåll eller vattenkvot.

- Vattenmättnadsgraden, (S_r) - förhållandet mellan porvattnets volym och den totala porvolymen. $\frac{V_w}{V_p}$
- Volymetriskt vatteninnehåll (θ) - förhållandet mellan porvattnets volym och den totala volymen av jord och porer. $\frac{V_w}{V}$
- Vattenkvot (w) - förhållandet mellan porvattnets massa och den totala massan för jord och vatten. $\frac{m_w}{m_s}$

Kvarvarande vatteninnehåll (θ_r) anger det mindre rörliga vatten som finns bundet i jord vilket kan fås att lämna jorden först vid höga tryck. Det kvarvarande vatteninnehållet har liten inverkan på förändringar som sker i jordens vatteninnehåll.

Uttrycket normaliserat vatteninnehåll tar hänsyn till det kvarvarande vatteninnehållet vilket dras ifrån halterna rörligt vatten vid beskrivning av vatteninnehåll. Normaliserat volymetriskt vatteninnehåll beräknas enligt ekvation 3.1.

$$\Phi = \frac{\theta - \theta_r}{\theta - \theta_s} \quad (3.1)$$

θ_s - vattenhalten vid mättnad.

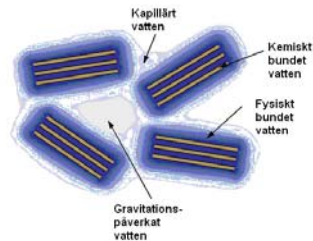
θ_r - kvarvarande vattenhalt. (Fredlund och Xing, 1994)

3.1 *Vattnets olika former i jord*

Vatten i jord delas in i rörligt och bundet vatten. Det rörliga vattnet består av kapillärt vatten och vatten som endast påverkas av gravitationen. Det bundna vattnet består av kemiskt bundet och fysikaliskt bundet vatten.

Kemiskt bundet vatten består av kristalliserat vatten i mineral ex $\text{Na}_2 \text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, medan det fysikaliskt bundna vattnet dras till jordpartiklarna av dess elektriska laddning (hygroskopiskt vatten) och av skillnader i jonsammansättning, osmos. De olika formerna illustreras i Figur 1.

Det bundna vattnet har en liten rörlighet men vid tillräckligt höga tryck eller temperaturer lämnar även det bundna vattnet jorden.



Figur 1 Vattnets olika former i jord (Vicaire 2)

Hygroskopiskt vatten finns runt lermineral. Ytan på lerpartiklar och de finaste siltpartiklarna (upp till 0,005 mm) har en negativ laddning till följd av lermineralens uppbyggnad. Dipolära vattenmolekyler binds därför till de negativa lerpartiklarnas yta. Effekten av denna laddning ges av förhållandet yta/area/massa. Ju mindre partiklar desto större är effekten av laddningen vilket gör att finare material håller mer hygroskopiskt vatten. (Axelsson 2005)

Det osmotiskt bundna vattnet påverkas av koncentrationen av joner i vattnet. Det är oberoende av jordens kornstorlekssammansättning och också i stort oberoende av vattenhalten.

Kapillärvattnet utgör störst volym av vattnet i jorden och är det som reagerar tydligast på infiltration och andra förändringar i vattenhalten. Det osmotiskt bundna vattnet har en viss rörlighet men så liten att den volymförändring det ger är försumbar (Lu och Likos, 2004). Det hygroskopiska vattnet finns som en tunn film runt partiklarna och är så hårt bundet att det inte påverkas förrän vid höga porvattentryck.

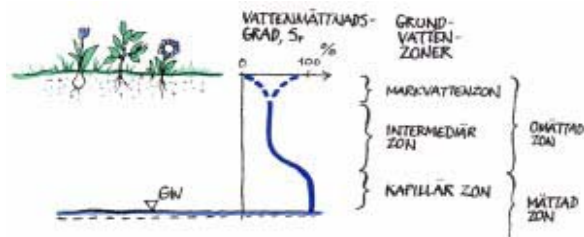
Hos kohesionsjordar ger hygroskopiskt vattnet upphov till sammanhållande kohesionskrafter mellan partiklarna. För friktionsjordarna kommer mineralytorna däremot att ligga i direkt kontakt med varandra då inget jonlager och inget bundet vatten finns på ytan. Vid tryck ifrån jordens tyngd eller yttre belastning, uppstår därför friktionskrafter i kontakten mellan partiklarna. (Axelsson, 2005)

De minsta siltfraktionerna håller hygroskopiskt vatten och binder jorden kohesivt medan stora delar av siltfraktionen har friktionskontakt mellan kornen. Beroende på sammansättningen kan silt bete sig mer eller mindre som en kohesionsjordart. (Knutsson m fl, 1998)

3.2 Zonindelning av en jordprofil

En jordprofil kan delas in i två huvudzoner med avseende på vattenförekomst, den mättade och den omättade zonen. Den mättade zonen sträcker sig upp till grundvattenytan och över den så långt som jorden är mättad med kapillärt stigvatten. Grundvattenytan definieras som en tryckyta där det uppåtriktade trycket från vatten är detsamma som atmosfärstrycket. Den del av markytan som är vattenmättad till följd av den kapillära stigningen kallas den kapillära zonen.

Den omättade zonen tar vid där den kapillära stigningen inte förmår mätta jorden och delas in i den intermediära zonen och markvattenzonen. I markvattenzonen tas mycket av vattnet från nederbörden upp av växterna, resten sjunker ner genom den intermediära zonen tills det når den mättade zonen. I Figur 2 visas en skiss av grundvattenzonerna tillsammans med en kurva över vattenmättnadsgraden vid de olika nivåerna (Knutsson m fl, 1998).



Figur 2 Zonindelning av en jordprofil, med avseende på vattenförekomst (Knutsson m fl, 1998).

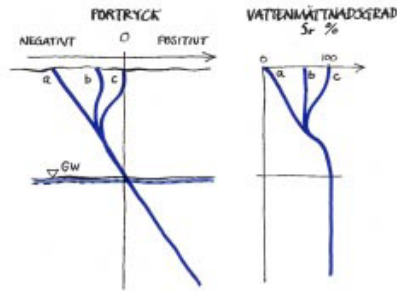
3.3 Portryck

Luft och vatten rör sig i utrymmet mellan jordpartiklarna, porerna. Trycket i porerna är stor betydelse för jordens egenskaper. Flödet av vatten genom jorden, spänningarna i jorden och dess deformationsegenskaper påverkas alla av vatteninnehåll och tryck i porerna. Porvattentrycket beror av flera olika faktorer exempelvis jordens sammansättning som är specifik för sin plats, bildningsmiljö och packningshistorik och av varierande faktorer som atmosfärstryck, temperatur, nederbörd och vattenkemi.

Det totala trycket i porerna, portrycket, består av summan av lufttrycket, kapillärtrycket och det osmotiska trycket. Vid beräkningar av portryck kan det osmotiska trycket ofta försummas (se avsnitt 4.1) och oftast är det rimligt att anta att lufttrycket i porerna är detsamma som atmosfärstrycket. När begreppet porvattentryck används avses därför vanligtvis kapillärtrycket.

Portrycket definieras i förhållande till atmosfärstrycket. I nivå med grundvattenytan är det noll. Vid hydrostatiska förhållanden ökar porvattentrycket linjärt under grundvattenytan, och sjunker linjärt över den. Hydrostatiskt tryck är det tryck som utövas på en vätska i jämvikt, dvs. ett hydrostatiskt tillstånd innebär att inga förändringar sker i vattenbalansen, till skillnad från hydrodynamiskt tillstånd då vattnet rör sig (Sällfors, 2001)

Hur portrycksprofilen ovanför grundvattenytan ser ut i praktiken är beroende av den specifika jordprofilen och dess vatteninnehåll. Figur 3 illustrerar en portrycksprofil för tre olika fall, torr jord, mellanfuktig jord och vid markytan vattenmättad jord (Knutsson m fl, 1998).



Figur 3 Schematisk portrycksprofil för jordar med olika vatteninnehåll. Torr jord (a), mellanfuktig jord (b) och vid markytan vattenmättad jord (c). (Knutsson m fl 1998)

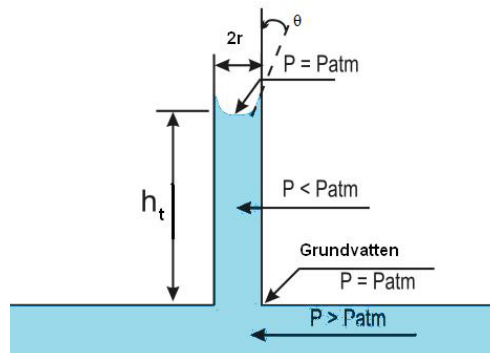
3.4 Kapillaritet

Kapillär stigning i jord påverkas av ytspänningen hos vattnet, dess bindningsvinkel mot mineralet och på porernas storlek. Stigningen i ett rör beräknas enligt sambandet i ekvation 3.2 och illustreras av figur 4.

$$h_t = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} \quad (3.2)$$

där

- h_t = kapillär stighöjd
- r = porernas radie
- σ = vattnets ytspänning
- θ = vattnets bindningsvinkel
- ρ = vattnets densitet
- g = tyngdaccelerationen



Figur 4 Kapillär stigning i ett rör, Vicaire 1.

Jordens porer kan liknas vid det rör som beskrivs i figur 4. Hos jord utgörs kapillärröret av porer och deras storlek blir avgörande för den kapillära stigningen. I Tabell 1 anges approximativ kapillär stigning för sand, silt och lera.

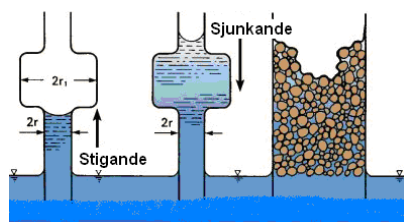
Tabell 1 Kapillär stighöjd för olika kornstorlekar, Axelsson, 2005.

Jordart	Stighöjd (m)
Sand	0,03-0,5
Silt	0,3-12
Lera	> 8

Höjden på den omättade delen av kapillärvattnet är beroende av materialets sortering. Ett väl sorterat material ger en lägre höjd, då det har en mindre spridning på porernas storlek. I ett

osorterat material med stor variation i porstorlek kan vattnet fortsätta stiga via de mindre porerna medan de större lämnas luftfyllda.

Vid kapillär stigning är det den största porradien som avgör hur högt vattnet når. När vattnet däremot sjunker, t.ex. till följd av en sänkt grundvattenyta, så är det den minsta radien i porsystemet som blir avgörande för höjden. Det gör att den kapillära höjden vid sjunkande vattenyta blir högre än motsvarande för kapillär stigning. Denna *hystereseffekt* har stor betydelse vid mätning och beräkning av negativa provtryck, se Figur 5.

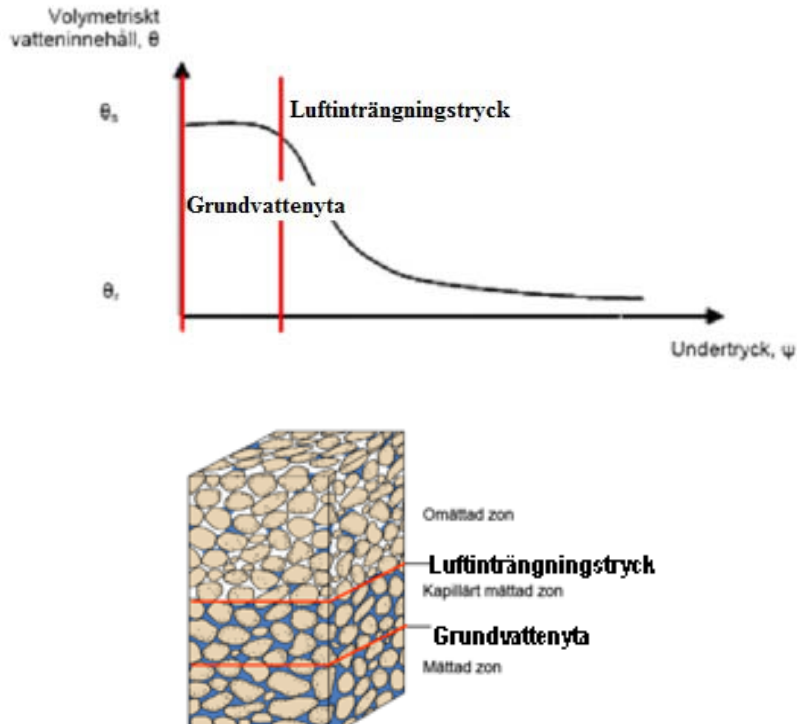


Figur 5 Hystereseffekt hos kapillärvatten, (Vicaire 4).

Det finns ytterligare ett par faktorer som kan bidra till hystereseffekten, men deras bidrag till fenomenet är ännu oklara. Den viktigare av dessa för silt är skillnaden i kontaktvinkel mellan stigande och sjunkande vatten. Kontaktvinkeln mot jordpartiklarna är mindre då vattnet stiger än då det sjunker, vilket påverkar kapillärtrycket, se ekvation (4.2) (Lu och Likos, 2004).

3.5 Vattenretentionskurvan

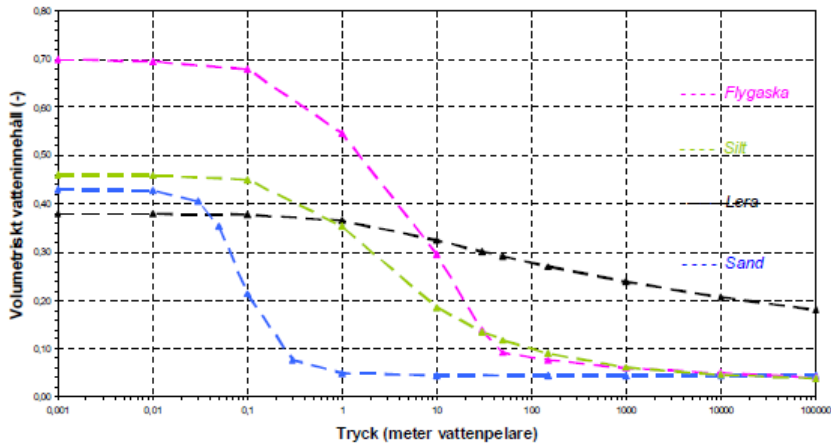
Förhållandet mellan vatteninnehållet i jord och det negativa portrycket är inte linjärt. Sambandet illustreras av en så kallad vattenretentionskurva, även kallad vattenbindningskurva eller pF-kruva. Figur 6 visar en stiliserad vattenretentionskurva där undertrycket angetts på x-axeln och det volymetriska vatteninnehållet på y-axeln. Grundvattenytan och det tryck vid vilket luft tränger in i porerna, luftinträngningstryck har markerats på kurvan och på en jordprofil bredvid.



Figur 6 Stiliserad vattenretentionskurva (överst) och jordprofil med luftinträgningsstryck och grundvattenyta markerade (Bertilsson 2010)

För att illustrera hela tryckintervallet används ofta en logaritmisk skala. I en pF-kurva används enheten cm vattenpelare för trycket och en pF-enhet är 10-logaritmen av detta värde. pF-enheter används oftare i samband med jordbruksrelaterade problemställningar.

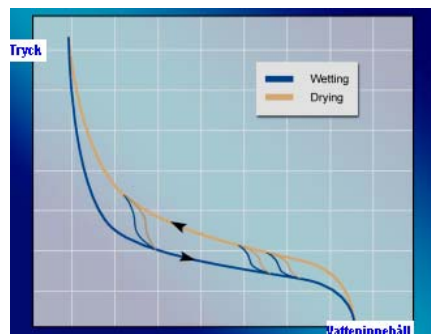
Vattenretentionskurvan har ett karakteristiskt utseende för varje jord, beroende på bland annat kornstorlek och sorteringsgrad. Figur 7 visar exempel på retentionskurvor för ett par olika jordarter. Finare jordar har generellt ett högre luftinträgningsstryck än de grövre. En brantare kurva indikerar generellt en lägre sorteringsgrad (Öberg, 1997).



Figur 7 Exempel på vattenretentionskurvor för olika material (Ezziyani och Holmén, 2009).

Till följd av hystereseffekten finns inte en retentionskurva per jord utan två. Vattenretentionskurvan visar antingen en stigande, återfuktande eller en sjunkande, dränerande situation. När förhållandet ändras från dränering till återfuktning och vice versa växlar vatteninnehållet mellan de två kurvorna. Trycket, ekvivalent med den kapillära stigningen, är störst för den dränerande situationen, se figur 8.

Störst är hystereseffekten för den del av kurvan där kapillärkrafter dominerar, dvs. innan trycken blir så höga att mest bundet vattnet återstår. Vid fluktuerande förhållanden ligger tryck och vatteninnehåll någonstans emellan de två ytterpunkterna som retentionskurvorna utgör. För ingenjörsmässiga beräkningar mäts ofta enbart den sjunkande kurvan, då denna är lättast att mäta. Vilken hänsyn som behöver tas till om det är ett sjunkande eller stigande scenario som betraktas beror på avsedd noggrannhet i beräkningarna. Felkällor så som bristande kunskap om fördelningen av porutrymmet kan dominera över påverkan från hystereseffekten (Vicaire).



Figur 8 Dränerande (gul) och återfuktande (blå) vattenretentionskurvor (Vicaire 3).

3.6 Beskrivning av vattenretentionskurvan

Uppskattning av en jords vattenretentionskurva kan i princip göras på två sätt:

- Direkt jämförelse med en databas bestående av generella vattenretentionskurvor utifrån jordens kornstorleksfördelning
- Anpassning till matematisk modell utifrån en laborativt bestämd vattenretentionskurva.

Fördelen med att använda en databas är att man kan uppskatta vattenretentionskurvan med hjälp av data som är lätta att bestämma, exempelvis kornstorleksfördelningen. För svenska jordar finns en databas (ej digitaliserad) sammanställd av Andersson och Wiklert (1972), där 385 jordar finns registrerade med vattenretentionskurva och kornstorleksfördelningskurva. Från databasen kan en approximativ retentionskurva tas fram genom att kornstorleksfördelningen för aktuellt prov bestäms och korreleras med motsvarande jord i databasen (Knutsson m fl, 1998). Ett annat exempel på en sådan databas är amerikanska UNSODA (unsaturated soil hydraulic database) med data från ca 800 jordar.

En nackdel med detta sätt att ta fram retentionskurvan är att det blir svårt att ta hänsyn till hystereseeffekten. För det måste riktningen på vattnets rörelse stämma överens med den hos databasens retentionskurva.

För att kunna utföra beräkningar av negativa portryck kan laboratoriedata behöva anpassas till en matematisk modell. En mängd förslag på matematiska modeller som beskriver vattenretentionskurvan har presenterats. Svårigheten med att hitta en generell ekvation ligger i att varje jord har en unik sammansättning av materialegenskaper, sortering, kornstorleksfördelning och packningshistoria. En modell av retentionskurvan är anpassad antingen till en stigande eller sjunkande kurva.

Gemensamt för de flesta av de ekvationer som tagits fram är att de anger en variabel relaterad till luftinträngningstrycket och en variabel relaterad till jordens permeabilitet eller kornstorleksfördelning. Vissa använder även en tredje parameter. Problemet har generellt uppstått med att korrekt beskriva kurvan i dess yttre ändar dvs. för de lägsta och de högsta trycken (Fredlund, 2006). Tre variabler ger oftast en noggrannare anpassning över ett större intervall än två. Däremot gör det modellen mer komplicerad och stelare. Ett par fasta punkter på kurvan brukar också anges, vattenmättnad, återstående vatteninnehållet och/eller luftinträngningstrycket (Lu 2004).

Nedan presenteras kortfattat tre av de mest vanligt förekommande ekvationerna; Brook och Corey (1964), van Genuchten (1980) och Fredlund och Xing (1994). Portrycket kan uttryckas antingen som höjden vattenpelare i meter (h) eller i kPa (ψ).

3.6.1 Brook och Corey (1964)

Brook och Corey var bland de tidigaste med att ta fram en ekvation för vattenretentionskurvan. Det normaliserade vatteninnehållet (Φ) är här beroende av ett porstorleksindex (λ) och luftinträngningstrycket (ψ_b). Modellen gör en skarp övergång mellan mättad och omättad zon. Det normaliserade vatteninnehållet ges av ekvation 3.3.

$$\Phi = \begin{cases} 1 & \Psi < \Psi_b \\ \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\lambda & \Psi \geq \Psi_b \end{cases} \quad (3.3)$$

Uttryckt med volymetriskt vatteninnehåll ger det ekvation 3.4,

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & \Psi < \Psi_b \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\lambda & \Psi \geq \Psi_b \end{cases} \quad (3.4)$$

θ_s - mättat volymetriskt vatteninnehåll

θ_r - kvarvarande volymetriskt vatteninnehåll

3.6.2 van Genuchten (1980)

van Genuchten använder sig av parametrarna, a , m och n för att beskriva vattenretentionskurvan se ekvation 3.6.

a - relaterad till luftinträningstrycket.

n - relaterad till lutningen på kurvan.

m - beskriver kurvans form där den planar ut mot det kvarvarande vatteninnehållet.

m och n är beroende av varandra enligt ekvation 3.5.

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3.5)$$

Modellen ger en mjuk övergång mellan den mättade och omättade zonen. Det normaliserade vatteninnehållet ges av ekvation 3.6.

$$\Phi = \left[\frac{1}{1 + (a\Psi)^n} \right]^m \quad (3.6)$$

med vatteninnehållet utskrivet ger det ekvation 3.7.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (a\Psi)^n\right)^m} \quad (3.7)$$

3.6.3 Fredlund och Xing (1994)

Fredlund och Xing har också beskrivit vattenretentionskurvan med tre parametrar a , n och m . De har använt en annan definition av parametrarna. Liksom hos van Genuchten är parametern a relaterad till luftinträngningstrycket, medan n och m beskriver kurvans form. n och m är inte beroende av varandra.

Fredlund och Xing har inte angett det kvarvarande vatteninnehållet direkt i ekvationen som van Genuchten och Brook and Corey gjort, se ekvation 3.8.

$$\theta = C(\Psi)\theta_s \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m \quad (3.8)$$

$C(\Psi)$ är en korrektionsfaktor för att styra ekvationen genom punkten 10^6 kPa där Fredlund och Xing utgår ifrån att vatteninnehållet är 0, se ekvation 3.9. Ψ_r är det tryck vid vilket det kvarvarande vatteninnehållet nås.

$$C(\Psi) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\Psi_r}\right)} \right] \quad (3.9)$$

4 Introduktion till simulering av omättad jord

Uttrycket flödesberäkningar används här som samlingsterm för beräkningar av totaltryck, portryck, strömningsriktningar och flöden. Exempel kan vara olika typer av förändringar i porvattentryck som skapas genom att anlägga dammar, reservoarer och dräneringar eller genom nederbörd.

4.1 Grundläggande ekvationer

Det som driver vattnets rörelse i jord är gravitationen. Ju större höjdskillnad över en viss sträcka desto snabbare transporteras vattnet genom jorden. Flöde av vatten genom jord beräknas med Darcys lag vilken beskriver hastigheten på vattnet som en funktion av höjdskillnaden (i) mellan två punkter och jordens permeabilitet, den hydrauliska konduktiviteten (k), se ekvation 4.1.

$$q = ki \quad (4.1)$$

q i ekvation 4.1 kallas Darcys hastighet. Det är inte vattnets verkliga hastighet då denna kräver att hänsyn tas till den area som faktiskt passeras av vattnet. Arean kan fås ur porositeten eller volymetriska vatteninnehållet för omättad jord (Krahn, 2004). I de beräkningsprogram som utvärderats i den här rapporten är det Darcy's hastighet som beräknats då flödeshastighet anges.

Darcys lag kan skrivas som i ekvation 4.2. Figur 9 illustrerar vattnets flöde mellan två punkter med olika höjdnivåer.

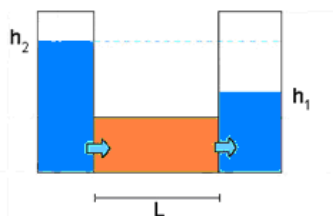
$$q = k \frac{H_2 - H_1}{L} \text{ m/s} \quad (4.2)$$

H = totala hydrauliska trycket, dvs.

$$H = \frac{u_w}{\rho_w g} + h \quad (4.3)$$

där u_w är porvattentrycket, h vattennivån.

L är avståndet mellan punkterna.



Figur 9 Visar de variabler som beskriver Darcys lag (Avdeleningen för teknisk vattenresurslära, LTH) .

För Darcys lag görs antagandet att vattnets densitet är konstant för olika tryck och temperatur.

Darcys lag togs först fram för att beskriva vattenhastigheten mättad jord där den hydrauliska konduktiviteten är en konstant. Sambandet gäller även för omättad jord med den skillnaden att

konduktiviteten beskrivs av en funktion. Konduktiviteten varierar med vatteninnehållet i jorden och därmed indirekt med porvattentrycket.

Genom att kombinera Darcys lag med lagen om konservering av massa får man den grundläggande partiella differentialekvation för flöde genom jord. Lagen om konservering av massa innebär att förändringen i flöde in och ut ur en referensvolym ska vara detsamma som förändringen i vatteninnehåll inom den volymen. I det tvådimensionella fallet fås följande ekvation för flöde (ekvation 4.4).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.4)$$

Θ = Vatteninnehåll

Beräkningarna av vattenflöde i jord görs i de simuleringar som utförts i denna rapport med antagandet att ingen yttre belastning tillförs på jorden som ändrar spänningsförhållandena. Atmosfärstrycket antas också vara konstant vilket innebär att förändringar i vatteninnehållet endast påverkas av förändringen i porvattentrycket. Då kan förändringen i vatteninnehåll beskrivas enligt Ekvation 4.5.

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (4.5)$$

m_w är en generell beskrivning av lutningen på vattenretentionskurvan för positiva och negativa tryck. m_w behandlas som en konstant inom varje beräkningssteg.

Då portrycket kan uttryckas som en funktion av totaltrycket (ekvation 4.3) kan vatteninnehållet skrivas som i ekvation 4.6.

$$\partial \theta = m_w \rho_w g \partial (H - z) \quad (4.6)$$

Det innebär att hela ekvation 4.4 kan uttryckas med variabeln H .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{m_w \rho_w g \partial (H - z)}{\partial t} \quad (4.7)$$

För steady state-simuleringar kommer summan av flöden in och ut ur referensvolymen att vara 0 då ingen förändring av vatteninnehållet i jorden sker. Det gör att vattenretentionskurvan inte behöver anges för steady state- simuleringar (Krahn, 2004).

4.2 FEM-nät

Konstruktion av FEM-nätet kan delas in i två huvudtyper, strukturerat och ostrukturerat nät. I det strukturerade nätet har elementen samma antal sidor i hela nätet. Det ostrukturerade nätet däremot har en varierande sammansättning där elementen kan ha olika antal sidor.

Mönstret för det ostrukturerade nätet beräknas efter de antal punkter som angivits längs geometrins kanter. Ändras punkternas placering eller antal så kan nätet få ett helt nytt mönster. Ett ostrukturerat nät ger högre flexibilitet för att konstruera komplicerade geometrier än det strukturerade då det lättare kan anpassas efter olika former.

Med det ostrukturerade nätet kan det vara svårare att uppskatta värden längs en vertikal profil. Noderna ligger inte längs en rät linje vilket gör att beräknade värden måste interpoleras till det ungefärliga värdet där linjen dragits.

Adaptive meshing innebär att nätet anpassas och förändras allt eftersom beräkningarna framskrider. Tätare nät skapas där förändringar är stora. En förtätning av nätet kan t.ex. följa en front som sprider sig. (Krahn 2007)

4.3 Visualisering av resultaten

För att kunna analysera beräkningsresultaten måste de visualiseras på ett överskådligt sätt. Det kan göras med grafer, tabeller och bilder. I stora drag ser rapporteringen lika ut för de program som används i den här rapporten. All den information som kan beräknas ur modellen kan redovisas i olika kombinationer. Exempelvis kan grafer ritas för hur trycket varierar i en punkt över tid, hur trycket varierar längs ett snitt vid en viss tidpunkt eller summan av flöde in och ut ur modellen.

Exempel på information som kan redovisas med linjer eller färgskala i bilden av geometrin är:

- Vektorer som visar hastighet på vattnet och flödesriktningar.
- Flödessektion, en vertikal eller horisontell profil som visar hur stort flödet genom detta snitt är.
- Totaltryck
- Porvattentryck

För en transient modell kan bilden varieras för att visa förhållandena vid de olika tidssteg som sparats.

4.4 Konvergens

För icke-linjära analyser utför numeriska analysprogram en rad beräkningar för att hitta rötter till differentialekvationerna. Det görs med någon typ av iterativ metod. Den iterativa metoden inleder med en gissning till en ekvations rötter och beräknar med den ett approximativt värde för dess funktion. För denna lösning tas en ny approximativ rot fram som används för att beräkna ett nytt värde på funktionen. Denna process fortskrider till dess att ett värde nås som ligger inom bestämda kriterier för lösningen (konvergenskriterier). När dessa nås anses lösningen konvergerad. Ibland kan problem uppstå med att nå en fram till en lösning som ligger inom önskat intervall. Då har konvergens inte uppnåtts.

5 Programvaror

5.1 Inventering av programvaror

I SGI's *Intern rapport 9* har Bertilsson (2010) gjort en inventering av tillgängliga programvaror för simulering av negativa portryck. Som komplement till denna inventering och för att få en mer heltäckande uppfattning om hur marknaden ser ut har en ytterligare inventering gjorts här.

Inventeringen har utgått från program som finns listade under rubrikerna *numerical analysis (soil)* och *numerical analysis general* på hemsidan <http://www.ggsd.com/>. GGSD står för geotechnical and geoenvironmental software directory. Sidan bygger huvudsakligen på information inskickad från företag och organisationer om deras programvaror.

Under var och en av rubrikerna *numerical analysis (soil)* och *numerical analysis general* finns ett 30-tal program listade. De program för Windows som utifrån hemsidorna verkade kunna beräkna negativa portryck har kontaktats via e-post för att bekräfta att så är fallet och om beräknade resultat kan användas i programmet för stabilitetsberäkningar. En sammanställning av resultatet av kontakterna finns i Tabell 2. Av de sex företag som kontaktats fanns bara ett som både kunde beräkna negativa portryck för transienta förhållanden och utföra stabilitetsberäkningar med hänsyn tagen till dessa: Soilvision.

Tabell 2 Programvarutillverkare kontaktade med förfrågan om möjligheten att simulera negativa portryck i deras program

Tillverkare	Program	Hemsida	Kommentar
Soilvision	SvFlux	http://www.comtecresearch.com/products.htm	Kan beräkna negativa portryck. Kan använda dessa för stabilitetsberäkningar.
Comtec research	Smap	http://www.comtecresearch.com/products.htm	Inget svar
Oasys software	Safe	http://www.oasys-software.com/	Kan inte beräkna negativa portryck.
Limitstate	Limitstate:Geo	http://www.limitstate.com/	Kan inte beräkna negativa portryck.
Fine - Civil engineering software	FEM	www.finesoftware.eu	Kan beräkna negativa portryck för steady state förhållanden. Kan använda dessa för stabilitetsberäkningar.
The Crisp consortium Ltd	Crisp	www.mycrisp.com	Inget svar

Comsol Multiphysics är också ett program som skulle kunna användas för flödesberäkningar vid omättade förhållanden. Möjligheten till detta har undersökts av Chui. Programmet är inte fullt anpassat för att lätt kunna utföra dessa beräkningar men möjligheterna finns.

Chui nämner också ytterligare två program vilka genomför beräkningar för omättad jord, Modhms utgivet av Hydrogeologic inc. och Hydrogeosphere vilket tagits fram vid Waterloo universitetet i samarbete med Hydrogeologic inc.

För att se i vilken utsträckning ett befintligt större beräkningsprogram så som Matlab har använts för infiltrationsberäkningar har en sökning gjorts på Google med sökorden *Seepage modelling, Matlab*. Det gav få relevanta träffar och det verkar inte som att Matlab används i större utsträckning till denna typ av beräkningar.

I tabell 3 visas den lista på program som Bertilsson (2010) tagit fram tidigare tillsammans med de program som hittats här, nämligen SvFlux, Comsol, Modhms, Hydrogeosphere.

Tabell 3 Sammanställning av program vilka kan utföra flödesberäkningar för omättade förhållanden.

Tillverkare	Programvara	Kommentar
Geostudio	SEEP/W	Används ihop med Slope/W för stabilitetsberäkningar.
Itasca	Flac	Med 2 phase flow modulen installerad.
Plaxis	Plaxis	Med Plax flow modulen installerad.
Zace services Ltd	Z_soil	
MIDAS Information Technology Co	Midas GTS	
Soilvision	Svflux	Används ihop med SvSlope för stabilitetsberäkningar
Comsol	Comsol Multphysics	
Waterloo universitet/ Hydrogeologic inc.	Modhms	
Hydrogeologic inc.	HydroGeo-Sphere	

5.2 Val av programvaror

SEEP/W har valts som referensprogram. Det är det program som SGI arbetat med tidigare (Bertilsson 2010). SGI hade en licens för SEEP/W och där fanns också kunskap om programmet och möjlighet att jämföra resultat med tidigare beräkningar utförda vid SGI. Syftet är att leta efter alternativ till SEEP/W.

Programmen som utvärderas ska kunna beräkna negativa portryck och det ska finnas möjlighet att använda beräknade portryck för stabilitetsberäkningar.

SvFlux valdes då det uppfyllde dessa kriterier och verkade intressant då det är särskilt inriktat just på flödesberäkningar med omättad jord.

Midas GTS valdes då det uppfyllde kriterierna och det fanns en tillgänglig provversion av programmet.

Av de övriga programmen som fanns att välja mellan så kontaktades Zace och Plaxis. Zace svarade först positivt till att bidra med en tidsbegränsad licens men svarade sedan inte på vidare mail, Plaxis kunde inte bidra med en gratisversion.

De utvalda programmen har sammanställts i Tabell 4

Tabell 4 Program som utvärderas i rapporten.

Program	Tillverkare	Använd version	Utgivningsår	Antal användare	Tillverkningsland
SEEP/W	Geostudio	SEEP/W 2007	1991 (föregångaren PC-SEEP kom 1987)	4000 olika företag	Kanada
SvFlux	Soilvision	SvFlux 7 SvOffice 2.2.33- 2.2.53	2000	Några hundra.	Kanada
Midas GTS	MIDAS Information Technology Co.	GTS 2010 Version 1.2 2010 och version 1.1 2011	2005	Ca 800	Sydkorea

5.3 Presentation av programvaror

5.3.1 SEEP/W

Geostudio har en struktur där olika geotekniska funktioner delats upp i olika program, vilka lätt kan överföra data emellan sig och är uppbyggda på liknande sätt. Ett av dessa program är SEEP/W vilket fokuserar på flödesberäkningar. SEEP/W är ett finite element program som utför analyser i två dimensioner. Räknaren är integrerad i programmet.

5.3.1.1 Nätet

Nätet i SEEP/W har en viss grad av automatisering men vissa inställningar måste göras manuellt såsom den generella storleken och förfining av kritiska områden. SEEP/W använder ett ostrukturerat nät som standard.

SEEP/W har en funktion som heter *Surface region mesh*. Det är ett strukturerat kvadratisk nät som kan läggas längs ytan där förändringarna i vattenförhållanden oftast är som snabbast och ett betydligt tätare nät kan krävas än för resten av modellen. Då riktningen på flödet huvudsakligen är vertikal här är nätet anpassat för detta. Det strukturerade nätet ger under dessa förhållanden effektivare resultat per antal noder. (SEEP/W, 2007)

Adaptive time stepping

I SEEP/W finns det möjlighet att lägga till extra tidssteg mellan dem som först definierats genom att välja automatisk adaptive time stepping. Den genererar automatiskt extra tidssteg där förändringarna i modellen är stora. De automatiskt anpassade tidsstegen kan skapas på tre olika sätt.

Två metoder tittar på totaltrycket på noderna. Den ena kontrollerar trycket på varje nod och jämför med det föregående steget. Den andra metoden använder vektornormen (se stycke 5.3.1.6) som utvärdering och jämför i sin tur denna mellan två efterföljande tidssteg. Användaren definierar själv en procentsats för hur mycket trycket kan variera mellan två tidssteg, överstigs det sätts extra steg in. Den tredje metoden registrerar hur många iterationer som krävs för att nå konvergens. Om antalet iterationer är större än 5 sätts extra tidssteg in.

5.3.1.2 Materialmodeller

Det finns tre olika materialmodeller att välja mellan i SEEP/W

- **Saturated/unsaturated** – kan modellera vatten och lufts egenskaper (tillsammans med Air/W) för både mättade och omättade förhållanden.
- **Saturated** – kan modellera vattens egenskaper vid mättade förhållanden.
- **Interface** – anger materialegenskaper för en linje. Den kan markera en gräns mellan olika områden eller ett tunt täckande lager.

- För modellering av mättade/omättade förhållanden där enbart vattnet modelleras anges följande materialegenskaper:
- **Hydraulic conductivity function** - En funktion för hur konduktiviteten varierar med portrycket.
- **Conductivity ratio** - anger hur stor konduktiviteten är i x respektive y riktning. För värdet 1 är den samma i båda riktningarna. Värdet 5 innebär att konduktiviteten är 5 ggr större i y - riktning än x - riktning.
- **Conductivity direction** – anger riktningen på den angivna konduktiviteten i grader utifrån positiva x-axeln.
- **Volume water content function** – vattenretentionskurvan. Måste inte anges vid steady state- analyses.
- **Activation PWP** – här kan porvattentryck vid utgångsläget anges.

För motsvarande modellering med enbart mättade förhållanden anges konduktivitet och vattenhalt som konstanter.

Möjlighet finns att exportera/importera dataset eller att fylla i dem direkt i SEEP/W. Data kan flyttas mellan olika Geostudio - filer men också till och från Excel.

5.3.1.3 Materialelegenskaper

I SEEP/W kan några olika sätt att ange data för vattenretentionskurvan väljas:

- Med datapunkter som man skriver in eller importerar till programmet.
 - Under kommandot *estimate* finns det ett par standarder att välja mellan för lera, silt, sand och grus.
 - Under *estimate* kan kornstorleksfördelning fyllas i (grain-size distribution) för att få en vattenretentionskurva uppskattad utifrån Aubertin m fl (2003) modell (Krahn 2007).
- Genom att fylla i parametrar för kurvan beskriven med Fredlund och Xings funktion.
- Genom att fylla i parametrar för kurvan beskriven med Van Genuchten's funktion.

- Med Add-in function kan en valfri ekvation läggas till.

Den hydrauliska konduktiviteten kan uppskattas utifrån vattenretentionskurvan. I SEEP/W finns två modeller för detta framtagna av Fredlund m fl 2004 och av Van Genuchten 1980. Uppskattningen görs för punkter på vattenretentionskurvan vilka användaren själv kan ange. Alternativt kan egna data importeras.

5.3.1.4 Randvillkor

De randvillkor som kan anges för beräkningar i SEEP/W är följande

- Head (H)
- Total Hydraulic Flux (Q)
- Unit Hydraulic Flux (q)
- Unit Gradient (i)
- Pressure Head (P)

Det går att välja att illustrera de valda randvillkoren i bilden av modellen och de visas då med olika färg och tecken för olika typer av randvillkor.

Randvillkor för transient analys kan anges som funktioner. De som finns att välja mellan är:

- Total head vs time.
- Total head vs volume.
- Nodal flux (Q) versus time.
- Unit flux (q) versus time.

Flöde in till systemet specificeras som positivt och flöde ut ur systemet som negativt. Kanterna på modellen förutsätts vara impermeabla om inget annat anges.

Avrinning

Avrinning i en slänt anges i SEEP/W som *total flux (Q)*, 0 m^3 , med rutan *potential seepage face review* ikryssad. Det innebär att om ett utåtriktat läckage konstateras vid beräkningarna så kommer randvillkoret att ändras till head (H) och trycket sätts till 0. Detta villkor motsvarar att det är en slänt där läckagevatten kommer att rinna av ytan och inte bilda en pöl eller sjö.

Initial water table kan användas som initialvärden till en transient modell i de fall då grundvattenytan är känd ifrån början. En hydrostatisk tryckfördelning görs då automatiskt utifrån angiven grundvattenyta.

5.3.1.5 Analys av resultaten

Det finns tre lägen att välja mellan i SEEP/W *define view*, *solve analyses* och *conture view*. I det första definieras modellen, i det andra beräknas lösningen och i det sista presenteras resultaten.

För att studera resultaten kan olika typer av information åskådliggöras i bilden av geometrin, vilket väljs under *view > properties*, tex. flödeslinjer, flödesriktning, tryckfördelning.

Resultaten kan också presenteras som grafer. Graferna görs under fliken *view>graphs* efter det att lösningen är klar.

I SEEP/W kan isolinjer redovisas för totaltryck eller porvattentryck från de olika tidsstegen i en transient analys. På så sätt kan tex grundvattenytans förändring med tid illustreras. Det går också att skapa en film som visar utvecklingen över tid av portryck eller totaltryck.

SEEP/W kan generera en rapport av modelleringen som redovisar modellens uppbyggnad, inlagda parametrar och randvillkor. Rapporten skapas via *view > report* som en word-fil.

5.3.1.6 Konvergens

Det finns, i SEEP/W, två sätt att bedöma om konvergens har uppnåtts eller om beräkningarna ska fortsätta, *Gauss point conductivity* och *vector norm*. Den första jämför information ifrån noderna och den andra ifrån Gauss punkter.

Gauss point conductivity

För transienta analyser är *Gauss point conductivity* inställt som standard. Den beräknar procentuella avvikelse på Gausspunkter som har en hydraulisk konduktivitet inom en viss tolerans, vilken innebär att de är konvergerade (SEEP/W, 2007).

Vektornorm

Istället för att jämföra individuella noder för att se skillnaden mellan två beräkningar så tar vektornormen hänsyn till alla noder samtidigt i jämförelsen. Vektornormen (N) är kvadratroten ur summan av alla noders värden upphöjda till 2. Skillnaden mellan N för två olika beräkningar är residualen av vektornormen vilken används för att bedöma konvergenskriterierna. Den här metoden används för att undvika att en nods avvikelse ska kunna fälla en lösning som i stort är att anse som konvergerad.

Om den beroende variabeln ligger nära 0 så kommer väldigt små skillnader mellan beräkningar att procentuellt vara stora. Det utgör ett problem med att konvergens kontrolleras utifrån procentuella förändringar. Fysikaliskt kommer dessa skillnader vara mycket små och ha liten betydelse men de tolkas som icke konvergerade resultat av räknaren. Det problemet undviks då en jämförelse görs med faktiska värden istället, tex. skillnaden 0.1 mellan två resultat. Detta i sin tur blir svårt när det handlar om mycket stora värden där det är rimligt att vänta sig större skillnader mellan två lösningar.

De här problemen kan undvikas med vektornormmetoden då de noder där det uppstår problem hanteras som en del bland lösningarna för alla noder.

Utvärdera om konvergens uppnåtts

I de fall där det är svårt att nå konvergens kan beräkningsprocessen svänga mycket fram och tillbaka med stora skillnader mellan två beräkningar. I SEEP/W kan grafkommandot användas för att ta fram en graf över skillnaderna vid varje beräkning vilken illustrerar svängningarna. Utifrån denna kan en manuell bedömning göras över när tillräcklig konvergens uppnåtts. Ett annat sätt är att jämföra graferna som visar tryck och konduktivitet för två efter varandra följande lösningar. Om de överlappar så har konvergens uppnåtts. Dessa två grafer kan

studeras under lösningsprocessens gång eller efteråt. Det är mest intressant i början av en analys som stöd för att hitta fungerande konvergensparametrar (Krahn, 2004).

Metoder för att uppnå stabilare lösningar

Ett sätt att bedöma lösningens trovärdighet är att titta på vattenbalansen för systemet. Dvs om mängden vatten som förändras i modellen stämmer överens med det flöde ut eller in till systemet som beräknats. Detta kan studeras för varje tidssteg vid en transient analys.

Omättade problem kan vara mycket olinjära. Linjäriteten är beroende av hur hydrauliska konduktivtetsfunktionen och vattenmättnadsgradsfunktionen ser ut. Om dessa ändras snabbt då trycket ändras, dvs. då kurvorna är branta, kan det bli svårt att nå konvergens. Mindre tidssteg och ett finare nät kan hjälpa.

I SEEP/W finns det kontrollparametrar för konduktivtetsfunktionen vilka kan varieras för att lättare nå konvergens. Dessa är *max change*, *min change* och *rate of change* vilka reglerar hur mycket konduktiviteten får ändras från ett beräkningssteg till nästa (Krahn, 2004).

5.3.2 SvFlux

Soilvision har byggt upp sina program som en svit med flera olika geotekniska program vilka sammanlänkas av programmet SvOffice. Till dessa finns också en databas innehållande materialegenskaper för olika jordar, databasen heter just Soilvision.

Det program som använts här är SvFlux vilket utför olika typer av flödesberäkningar för mättad och omättad jord.

Programmen i SvOffice är finite element program vilket kan utför analyser i 1, 2 och 3 dimensioner. Den version som har använts här är gjord för maximalt 2 dimensioner. Räknaren ligger i ett separat program vid namn FlexPDE.

Soilvision

Soilvision är ett program som innehåller en databas med laboratedata för över 6000 jordar. I Soilvision finns en fil med möjlighet att bygga sin egen databas där användaren kan lägga in information om jordar som den arbetar med. Programmet erbjuder möjlighet till ett omfattande förarbete inför vidare matematiska analyser i SvFlux.

5.3.2.1 Nätet

Programmet FlexPDE generar nätet och utför beräkningarna för problem formulerade i SvFlux. Som standard använder FlexPDE *adaptive meshing* med ett triangulärt ostrukturerat nät. Nätet genereras helt automatiskt. Möjlighet finns att göra egna inställningar och dessa inställningar för nätet görs i programmet SvFlux. Här kan storleken anpassas och förtätningar göras för separata delar av modellen. Det går att stänga av *adaptive meshing* och få ett konstant nät för hela modellen.

Adaptive time stepping

Med det anpassade nätet följer också att tidsstegen är anpassade. Tidsstegen skapas automatiskt i SvFlux. Det går att reglera största och minsta storlek på tidsstegen.

5.3.2.2 Materialegenskaper

De ekvationer för vattenretentionskurvan som finns att välja mellan i SvFlux är:

- Fredlund and Xing fit
- Van Genuchten fit
- Van Genuchten and Mualem fit
- Gardner fit
- Brooks and Corey fit
- Gitirana and Fredlund fit
- Fredlund 2-point fit
- Fredlund bimodal fit
- Constant/expression
- Data

Den formulering av vattenretentionskurvan som SvFlux kallar van Genuchten and Mualem motsvarar det som angivits som van Genuchtens ekvation i SEEP/W.

För hydrauliska konduktiviteten finns följande modeller i SvFlux:

- Fredlund and Xing estimation
- Modified Campbell Estimation
- Van Genuchten and Mualem estimation
- Leong and Raharadjo Estimation
- Brooks and Corey estimation
- Gardner fit
- Fredlund 2-point estimation
- Expression
- Data
- Constant

Den hydrauliska konduktiviteten kan uppskattas baserat på vattenretentionskurvan. I SvFlux måste skattningen av hydrauliska konduktiviteten göras med en modell med samma upphovsmän som den som använts för vattenretentionskurvan. För att skatta konduktiviteten med Leong and Raharadjo Estimation och Modified Campbell Estimation används Fredlund and Xing som vattenretentionskurva.

SvFlux har en kurvanpassningsfunktion med vilken laboratoriedata kan anpassas till valfri modell för vattenretentionskurvan.

När materialegenskaperna anges som ekvationer i SvFlux visas en ruta med *corrected saturated hydraulic conductivity* under fliken *hydraulic conductivity*. Korrigerad mättad konduktivitet är värdet på k vid *saturation suction*. Ekvationerna för vattenretentionkurvan är definierade för negativa portryck. *Saturation suction* anger det tryck då övergången sker mellan vattenretentionskurvan och en rät linje med lutningen m_v vilken anger de positiva portrycken.

Saturation suction anges tillsammans med vattenretentionskurvan som ett värde nära 0 men inte 0. Övergången mellan vattenretentionskurvan i det negativa tryckintervallet och den rätlinjiga kurvan i det positiva tryckintervallet sker här. Övergångens skarphet anges av ett tryckintervall inom vilket den ska ske, *transition width* som är förinställt på 0,02 kPa. *Saturation suction* används för att undvika numerisk instabilitet då vattenretentionskurvorna

närmar sig 0 kPa och skapa en kontinuerlig övergång till den räta linjen som anger positiva portryck.

Det volymetriska vatteninnehållet motsvarar det som beräknas för vattenretentionskurvan fram till *saturation suction* då det övergår till det angivna mättade vatteninnehållet. Den korrigerade mättade konduktiviteten är något lägre än den angivna och värdet visas för att det ska vara tydligt vilket det använda k-värdet är. (Thode, 2011)

5.3.2.3 Randvillkor

Randvillkor appliceras medurs runt modellen så att ett givet villkor fortsätter att gälla för alla stäckningar fram tills något annat anges. Det gör att samma villkor inte behöver anges för varje delsträcka i en modell. Överlappande geometrier gör att olika randvillkor kan komma att anges för samma sträcka. Geometrierna ges en inbördes ordning och SvFlux kommer då att ta hänsyn till den som hör till en dominerande geometrin.

Kanterna på modellen förutsätts vara impermeabla om inget annat anges (Thode m fl, 2008).

Climate manager

Under boundary condition kan villkoret *climate väljas*. Hur detta ska se ut ställs in i SvFlux *climate manager* som är en separat dialogruta. Den är mest användbar för tidsberoende modeller men vissa aspekter kan användas för steady-state modeller. I climate managern kan data för nederbörd, avdunstning och transpiration anges.

Avrinning

I SvFlux anges avrinning med villkoret *review boundary* eller i climate managern där en nederbörd med avrinning (runoff) kan appliceras.

Med *review boundary* utvärderas portrycket längs den angivna ytan och då det är över 0 så ändras randvillkoret från zeroflux till ett negativt flöde som jämnar ut trycket ner till att $h=y$. Nederbörd kan inte anges.

I *climate managern* kan nederbörd anges och trycket ställas in för när avrinning ska gälla. Ett högre tryck kan motsvara att en damm bildas där vattnet kommer ut.

Under fliken *review by pressure* kan två olika sätt att utvärdera randvillkoret *review boundary* väljas, linjärt eller kvadratiskt. Valet hänvisar till hur villkoren för detta randvillkor formuleras och de två formuleringarna ser ut som följer

1. if $h > y$ then flux = $-big * (h-y)$ else flux = 0
2. if $h > y$ then flux = $-big * (h-y)^2$ else flux = 0.

Formulering nummer två ger en mjukare övergång mellan randvillkoren total tryck och flöde (flux).

Initial water table kan användas som initialvärden till en transient modell i de fall då grundvattenytan är känd ifrån början. En hydrostatisk tryckfördelning görs då automatiskt utifrån angiven grundvattenyta.

5.3.2.4 Analys av resultaten

För SvFlux presenteras resultaten i de båda programmen Flex PDE och Acumesh. FlexPDE visar grafer och modeller som kan studeras under lösningens gång. Det ger en översikt över hur lösningen fortskrider. För bearbetning av resultaten används Acumesh som är ett program utvecklat av Soilvision för visualisering och bearbetning av resultaten.

Under rubriken *plot manager* i SvFlux väljs vilka grafer som ska ritas av solvern FlexPDE.

Plotmanager

Plotmanager skapar grafer för snabb visualisering av resultaten. För vidare analys och bearbetning av grafer så måste de sparas som en write.txt-fil, denna kan öppnas i Acumesh. Några av de typer av grafer som kan skapas är:

- Fluxsection – flödet i en sektion kan utvärderas och resultatet illustreras med en graf.
- Boundary flux – när ett flux-villkor angivits illustreras det här.
- Climate – när climate managern använts kan dessa randvillkor illustreras här.
- Review boundary – när review boundary valts som randvillkor kan resultatet av detta illustreras här.
- Point – valda variabler utvärderas i en punkt.

5.3.2.5 Övrigt

Stages – lösningar i flera steg

I steady state-analyser med omättade förhållanden gör SvFlux automatiskt beräkningen i två steg. Steg 1 löser modellen för mättade förhållanden. Steg 2 använder lösningen i steg 1 som initialvärden för den omättade lösningen. Automatiskt visas resultaten från steg 2 men man kan välja under *Steady-state-pre-condition display* att se det första stegets resultat.

Det går också välja att göra en steady-state lösning i flera steg. Genom att gradvis variera någon parameter kan problem med att nå konvergens undvikas. Exempelvis kan vattenretentionskurvans lutning gradvis ökas genom att lösningen körs i flera steg.

En statistisk variation av en parameter i modellen kan också göras. Ett exempel på det är att beräkna vattenflödet genom en bank i anslutning till en damm. I första steget beräknas flödet vid steady state. Därefter görs en stokastisk parameteranalys för att se hur känsligt flödet är för förändrad lutning på konduktivitetskurvan. Den kan modelleras med exempelvis 50 steg, vilket innebär 50 beräkningar av modellen med varierande värden på parametern p i den funktion som ger konduktivitetskurvan (modified campbell) fördelade på en normalfördelning med medelvärdet 5 och standardavvikelsen 2. De värden som de olika stegen ger på flödet kan presenteras med *flux section history report* som ger en graf där flödet i en punkt för varje steg visas. Inställningar av antal steg görs under rubriken FEM-options i model menyn.

Övergång från steady state till tidsberoende analys

När en ny modell startas i SvFlux så ställer användaren in om lösningen ska vara steady state eller transient. Den inställningen kan inte ändras sedan arbetet med modellen påbörjats. För

att kunna använda samma modell med ändrade inställningar så måste den sparas igen med *spara som*. Då ges möjligheten att ändra modellinställningarna.

När den nya filen öppnas kommer en ruta upp som beskriver de ändringar som programmet gör på filen för att anpassa den till en tidsberoende modell. Inställningar som gjorts under FEM options, Global mesh generation options och Global plot option återställs. Inställningarna under initial conditions ändras till transfer file, inställda grafer ändras i formatet från reports till histories och stages sätts till 1 då den tidsberoende modellen redan görs i flera tidssteg.

Formulering av den generella differentialekvationen

Det finns tre olika formuleringar av den tidsberoende differentialekvationen i SvFlux. Den enklaste kallas h-based och motsvarar den som redovisats under kapitel 5.5.

Konvergens

För flödesanalys används Newton Raphsonmetoden för iterationprocessen.

5.3.3 Jämförelse SEEP/W och SvFlux

Strukturen som används av tillverkarna Geostudio och Soilvision liknar varandra då de har samma uppdelning med olika geotekniska funktioner placerade i olika program.

SEEP/W kan kombineras med Air/w för att göra mer klimatspecifika analyser som tar hänsyn till lufttryck, evatranspiration, olika typer av nederbörd med mera. I SvFlux motsvaras Air/w 's funktioner i stort av climate data managern.

För stabilitetsanalyser kan data ifrån SEEP/W användas i Slope/w. Motsvarande för SvFlux är SvSlope som kan använda data från SvFlux för stabilitetsberäkningar.

Arbetsgången vid uppbyggnad av ett en modell är i stort sett densamma i SEEP/W och SvFlux.

Geometrier kan importeras och exporteras i .DXF filformat för både SvFlux och SEEP/W.

Materialegenskaper och geometri kan importeras direkt till Soilvision ifrån Geostudio men inte vice versa. Följande tabell tagen ifrån hjälpaavsnittet till SvFlux visar hur program och materialtyper i Geostudio motsvaras av programmen i Soilvision.

Tabell 5 Jämförelse av program i Soilvisoin och Geostudio

SEEP/W	SVFLUX
Unsaturated	Unsaturated
Saturated	Saturated
TEMP/W	SVHEAT
Regular type	Regular type
SIGMA/W	SVSOLID
Linear-Elastic	Linear Elastic
Hyperbolic Nonlinear-Elastic	Hyperbolic
Elastic-Plastic	Mohr Coulomb
SLOPE/W	SVSLOPE
Mohr-Coulomb	Mohr Coulomb
Bedrock	Bedrock

5.3.4 Midas GTS

Den ursprungliga tanken var att utvärdera Midas GTS på samma sätt som de övriga två programmen. Försök har gjorts att ställa upp och beräkna samma exempel i Midas GTS som i SEEP/W och SvFlux. Arbetet med Midas GTS har upplevts som problematiskt då programmet varit svårt att använda. Lösningar för de exempel som presenteras under kapitlet *Utförda simuleringar* har inte kunnat presenteras. Därför finns inte Midas GTS med i den övriga rapporten. Här nedan görs en presentation av programmet och under kapitlet *Utvärdering av Midas GTS* redovisas arbetet med Midas GTS och de problem som stötts på.

Midas GTS är ett fintite element program som kan utföra analyser i en, två och tre dimensioner.

Midas GTS fokuserar inte på flödesanalyser utan är ett mer övergripande geotekniskt beräkningsprogram. Exempel på beräkningar som kan utföras är analys av tunnelkonstruktion, stabilitet, sättningar, jordbävningar och vibrationer. Data ifrån flödesanalyser kan direkt användas vid beräkningar av stabilitet.

Räknaren till Midas GTS ligger i ett separat program som är tillverkat av TNO Diana och heter Multi Frontal Sparse Gaussian solver.

Modellerna ritas i ett CAD-fönster och geometrier kan importeras ifrån CAD-program i .DXF filformat.

5.3.4.1 Nätet

Det finns tre olika metoder för att generera nätet. Det kan göras med *Auto-mesh* som automatiskt ritar upp ett ostrukturerat nät, *Mapped-mesh* är också en automatisk konstruktion men skapar ett strukturerat nät, and *Protrude-mesh* ger möjlighet till en helt manuell konstruktion av nätet.

5.3.4.2 Materialegenskaper

Valmöjligheter för att ange vattenretentionskurva och hydraulisk konduktivitet i Midas GTS visas i tabell 6.

Tabell 6 Vatteninnehåll och hydraulisk konduktivitet i Midas GTS

Vatteninnehåll	Hydraulisk konduktivitet
Van Genuchten	Gardner coefficients
User defined	Frontal function
	User defined

5.3.4.3 Analys av resultat

Programmet kan generera en rapport och tabelldata kan överföras till Excel.

5.3.4.4 Konvergens

För flödesanalys används Newton Rhapson metoden för iterationprocessen.

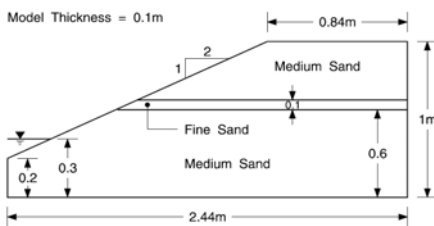
6 Utförda simuleringar

Sandbox, reservoir, och pond infiltration är rekonstruktioner av exempel presenterade av Geostudio. Parameterstudien görs för en modell som använts av Rebecca Bertilsson i en tidigare parameterstudie (Bertilsson 2010).

6.1 Sandbox

Modellen i Sandbox utgår ifrån ett experiment som utförts i laboratorium (Rulon and Freeze (1985)) och dimensionerna är 1 m på höjden och ca 2,5 m på bredden. Boxen var 10 cm djup. Experimentet gjordes för att utvärdera hur grundvattenytan utvecklas i en slänt där ett tätare lager delar av en slänt som i övrigt är mer genomsläpplig.

Analysen som gjorts är av typen *steady state*. Modellen av boxen syns i figur 10.



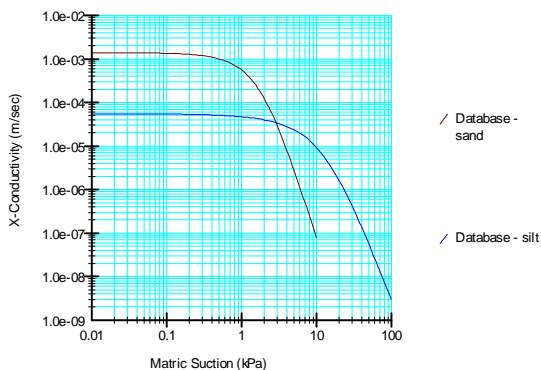
Figur 10 Sandbox - modell med måttangivelser

6.1.1.1 Geometri

Den geometri som angivits motsvaras av figur 10 med den skillnaden att längden på basen satts till 2,5 m.

6.1.1.2 Materialegenskaper

De materialegenskaper som angetts är tagna ifrån Geostudios exempel, jordarterna sand och silt har använts. I det här exemplet har endast data för konduktiviteten vid olika portryck angivits. Volymetriska vatteninnehållet är inte nödvändigt för steady state analyser (kap 5.1). Data för konduktiviteten visas i figur 11.



Figur 11 Hydraulisk konduktivitet för materialen sand respektive silt i exemplet Sandbox.

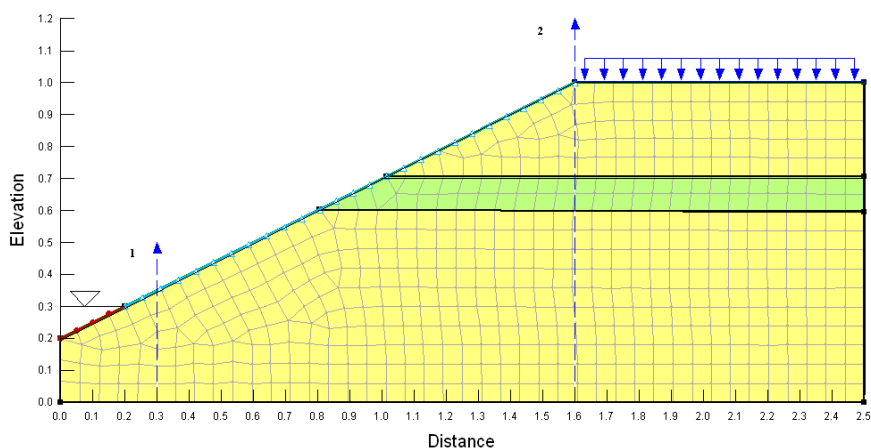
6.1.1.3 Randvillkor

De randvillkor som angivits är:

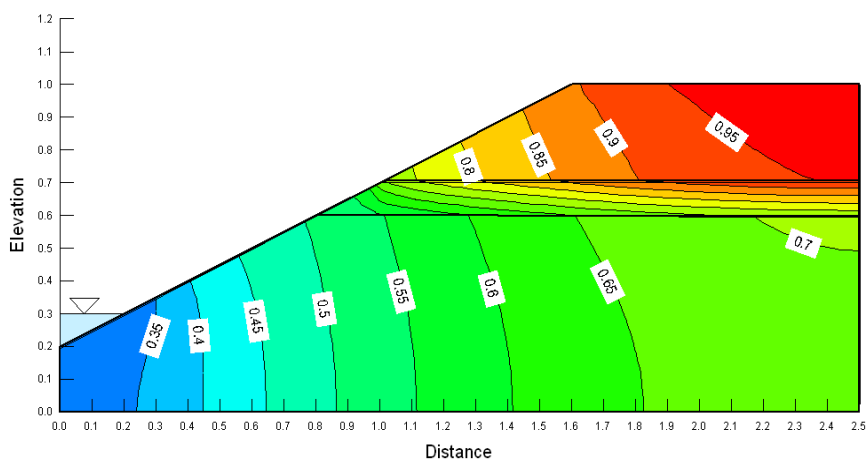
- En konstant nederbörd på $2,1 \cdot 10^{-4}$ m/s på släntens övre yta.
- Ett potentiellt läckage i släntens sluttning.
- Ett totaltryck på 0.3 m vattenpelare på den del av slänten som står under vatten.

6.1.2 Simulering med SEEP/W

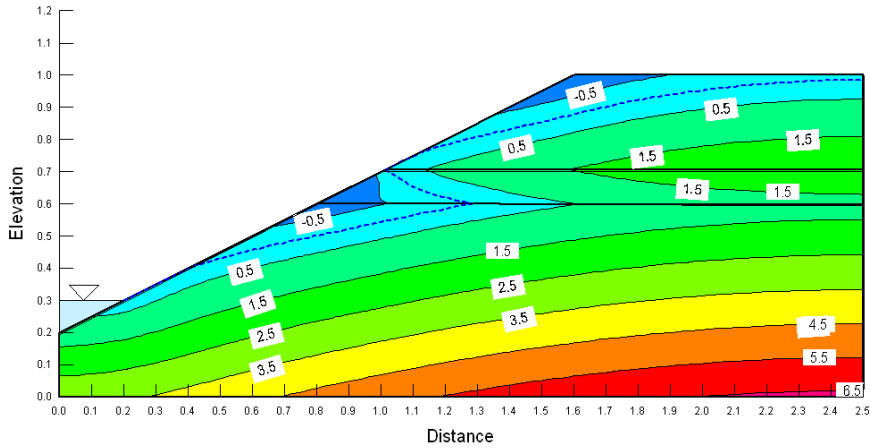
Figur 12 visar hur nätet ser ut i SEEP/W. Här är också de två flödessektionerna, randvillkor och material markerade. Figur 13 visar hur totaltrycket utvecklats i banken. I figur 14 visas porvattentryckets fördelning med markerad grundvattenyta. Tabell 7 visar resultatet för de två flödessektionerna.



Figur 12 Nät, randvillkor och markerade flödessektioner i SEEP/W



Figur 13 Totaltryck (m) i SEEP/W



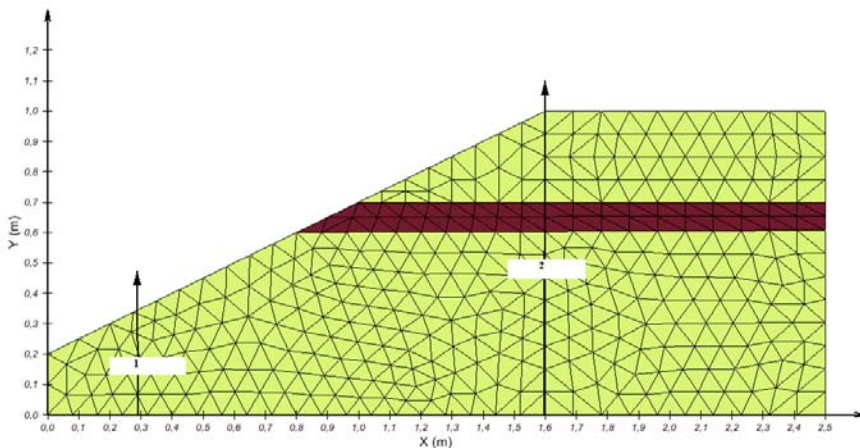
Figur 14 Porvattentryck (kPa) med markerad grundvattenyta för SEEP/W

Tabell 7 Resultat från flödessektioner i SEEP/W

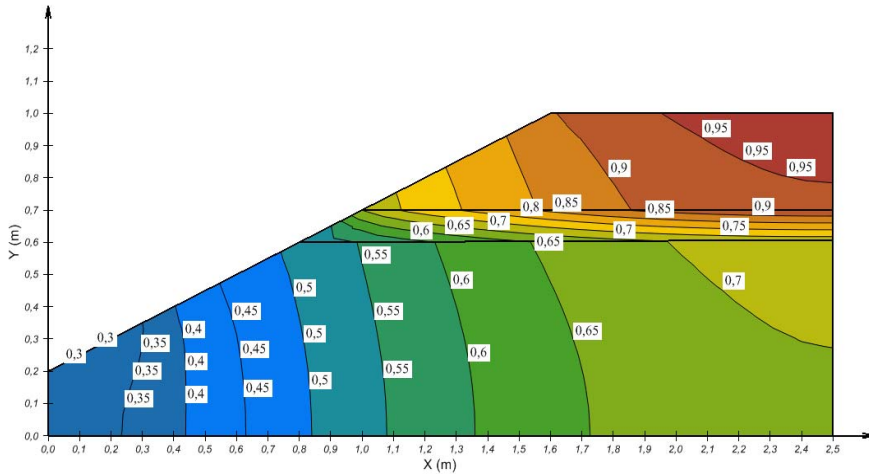
Flödessektion 1	1,49 e-4 m ³ /s
Flödessektion 2	1,83 e-4 m ³ /s

6.1.3 Simulering med SvFlux

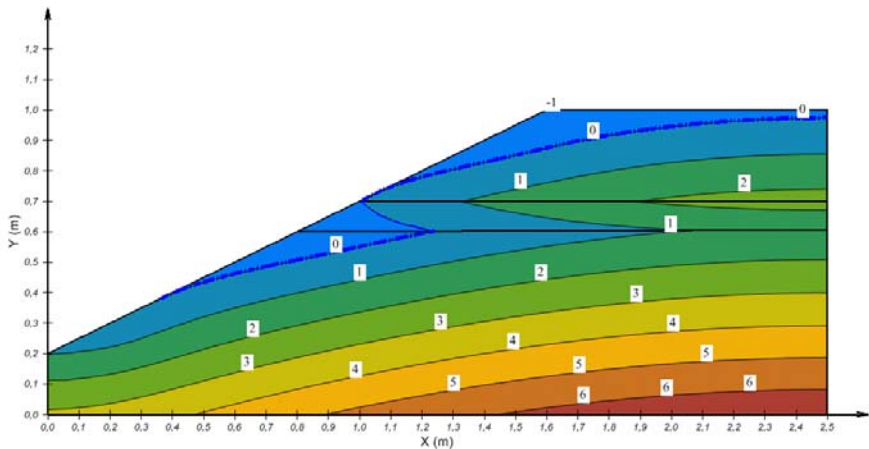
Figur 15 visar hur nätet ser ut i SvFlux. Här är också de två flödessektionerna, randvillkor och material markerade. Figur 16 visar hur totaltrycket utvecklats i banken. I figur 17 visas porvattentryckets fördelning med markerad grundvattenyta. Tabell 8 visar resultatet för de två flödessektionerna.



Figur 15 Nät och markerade flödessektioner i SvFlux



Figur 16 Totaltryck (m) i SvFlux



Figur 17 Porvattentryck (kPa) med markerad grundvattenyta för SvFlux

Tabell 8 Resultat från flödessektioner i SvFlux

Flödessektion 1	1,48 e-4 m ³ /s
Flödessektion 2	1,90 e-4 m ³ /s

6.1.4 Diskussion

I figur 17 och 14 syns att två grundvattenytor har utbildats. Ett läckage sker i slänten vid övre kanten av siltlagret. Därunder följer en omättad zon kanten av slänten till nästa grundvattenyta möter markytan vid 0.3 m.

I stort stämmer lösningarna från de båda programmen väl överens. Resultaten från de båda flödessektionerna ligger mycket nära varandra. I övre högra kanten av modellen skiljer sig

totalatrycken åt. Skillnaderna kan bero på randeffekter mot kanten av modellen. De kan även bero på att inte exakt samma tidssteg och nät använts i de båda modellerna.

6.2 Reservoar

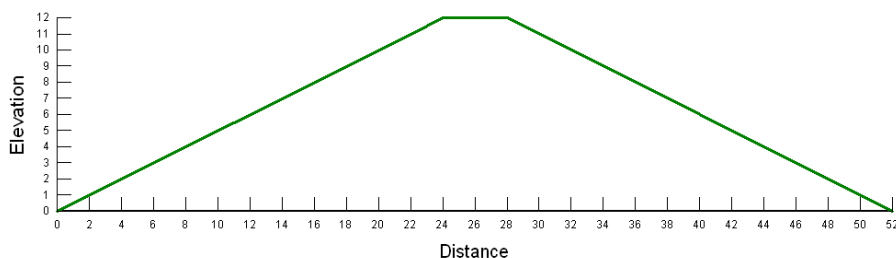
Det här exemplet illustrerar hur grundvattenytan förändras i anslutning till att en reservoar fylls, står en tid full och sedan töms. I SEEP/W har exemplet konstruerats med fyra analyser som skiljer sig åt genom att olika randvillkor angivits för den sträcka som gränsar till reservoaren.

1. Steady state analys av den tomma reservoaren. Portrycket beskrivs som linjärt genom banken.
2. Reservoaren fylls under tiden 0-175 dagar.
3. Reservoaren står med vatten i under tiden 175-375 dagar
4. Reservoaren töms under tiden 375-405 dagar.

I SvFlux har alla stegen gjorts i samma modell där villkoren angetts i en ekvation med en *else-if* sats.

6.2.1 Geometri

Geometrin illustreras av figur 19. Höjden på banken är 12 meter, bredden på basen 52 meter och bredden på toppen 4 m.



Figur 18 Måttangivelser för banken.

6.2.2 Materialegenskaper

Endast ett material har använts vilket bygger upp banken. De materialegenskaper som angetts är tagna ifrån Geostudios exempel. Nedan visas data för konduktiviteten och vattenretentionskurvan.

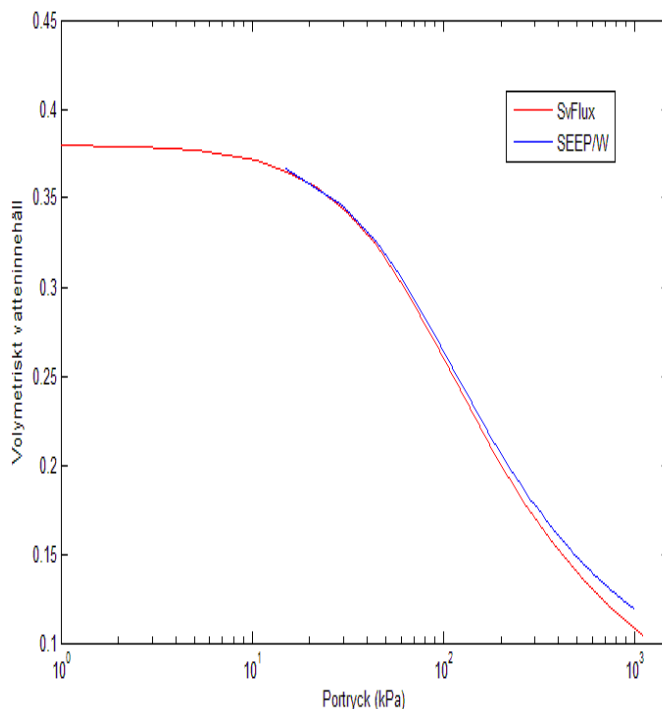
De punktdata som i SEEP/W användes för att beskriva vattenretentionskurvan utan anpassning till någon ekvation gick inte att använda på motsvarande vis i SvFlux. En anpassning av dessa data till Fredlund och Xings ekvation för vattenretentionskurvan gjordes därför, vilken användes vid beräkningarna i båda programmen. Anpassningen gjordes i SvFlux och gav följande värden på parametrarna:

$$\begin{aligned} a &= 58,8 \text{ kPa} \\ n &= 1,48 \\ m &= 0,77 \\ h_r &= 566 \text{ kPa} \end{aligned}$$

h_r är det tryck vid vilket det kvarvarande vatteninnehållet nås. Det används i Fredlund och Xings uppskattning av vattenretentionskurvan för att ta fram den parameter (C) vilken styr ekvationen mot 0 då portrycket når -10^6 kPa.

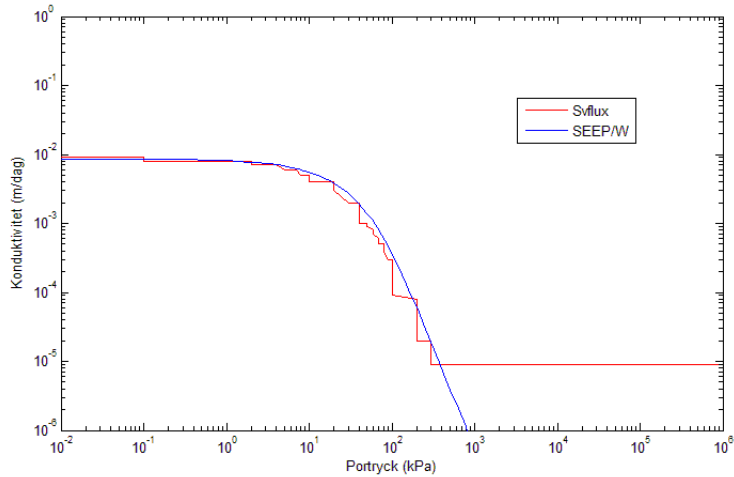
Figur 19 visar vattenretentionkurvan angiven i SEEP/W respektive SvFlux. De två kurvorna skiljer sig åt något för tryck högre än 100 kPa. h_r kan inte anges då parametrarna för Fredlund och Xing förs in i SEEP/W. Formuleringen av parametern C skiljer sig därför åt något i SEEP/W och SvFlux. Det kan förklara att formen på kurvan vid höga undertryck ser något olika ut för de båda programmen.

Mättad hydraulisk konduktivitet=0,0086 m/dag
Mättat vatteninnehåll=0,38



Figur 19 De vattenretentionskurvor som använts i exemplet Reservoar.

Utifrån vattenretentionskurvan har uppskattning gjorts av den hydrauliska konduktiviteten i respektive program. De punktdata som uppskattning gett har använts för att göra graferna i figur 20.



Figur 20 Konduktivetsdata för SEEP/W och SvFlux som använts i exemplet Reservoar.

6.2.3 Randvillkor

- Ett läckage har angivits som totaltryck=0 kPa längs nederkanten bankens högra hörn för från $x=44$ till $x=52$ m .
- Påfyllningen har angivits som en funktion där totaltrycket går ifrån 0 till 11 m under 175 dagar längs den vänstra kanten av modellen.
- Då reservoaren står full anges ett konstant totaltryck på 11 m .
- Dräneringen anges som en funktion där totaltrycket går från 11 till 0 m på 30 dagar.

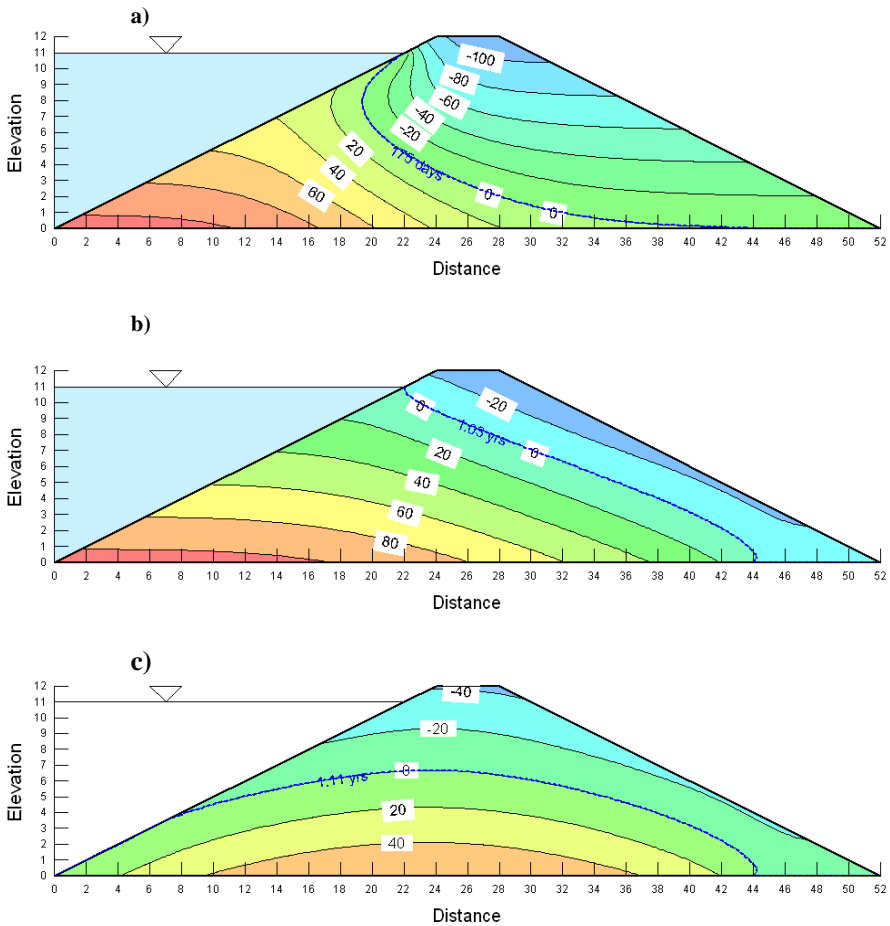
6.2.4 Tidssteg

För SvFlux har anpassade tidssteg använts. Här visas vilka tidssteg som använts i SEEP/W. Det första tidssteget är en steady state analys av förhållandena innan fyllningen. De övriga är transienta analyser.

Tidsstegen som angivits är:

1. Steady state.
2. Exponentiell ökning med 10 tidssteg upp till 175 dagar, startar med en ökning på två dagar.
3. Linjär, med 10 tidssteg vilket ger 20 dagar i taget.
4. Linjär, med 11 tidssteg vilket ger en meters sänkning för varje beräkningssteg.

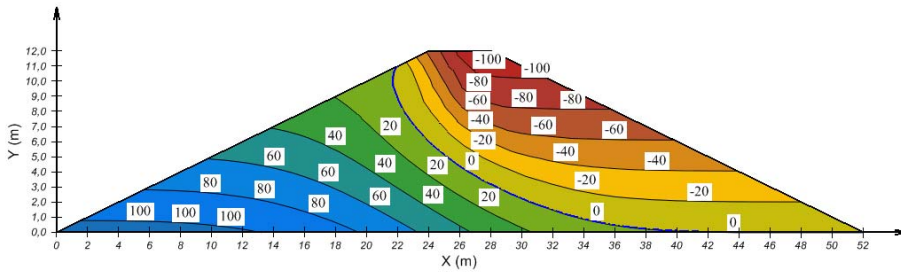
6.2.5 Simulering med SEEP/W



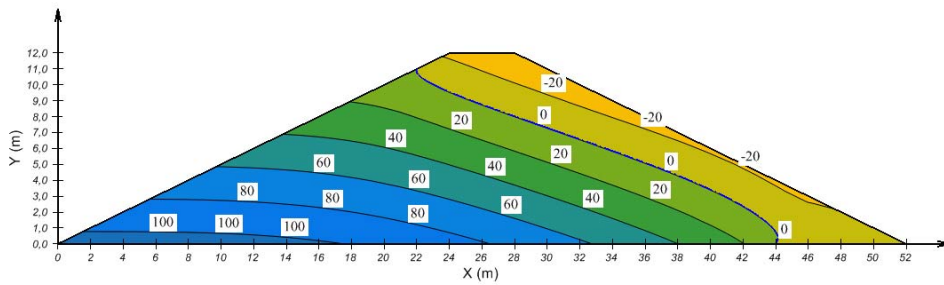
Figur 21 Visar portrycksnivåerna i banken för SEEP/W. a) Efter fyllning av reservoaren b) Efter att reservoaren stått full 200 dagar c) Efter dränering.

6.2.6 Simulering med SvFlux

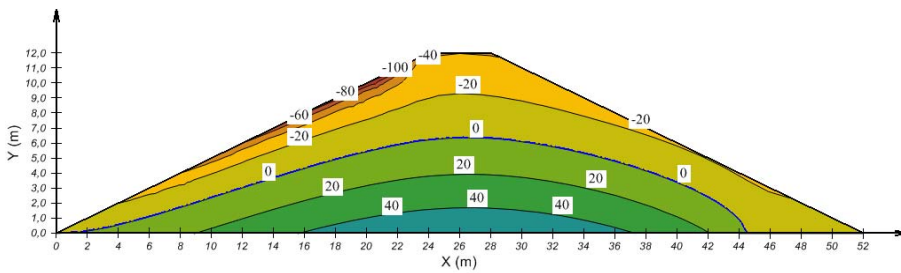
a)



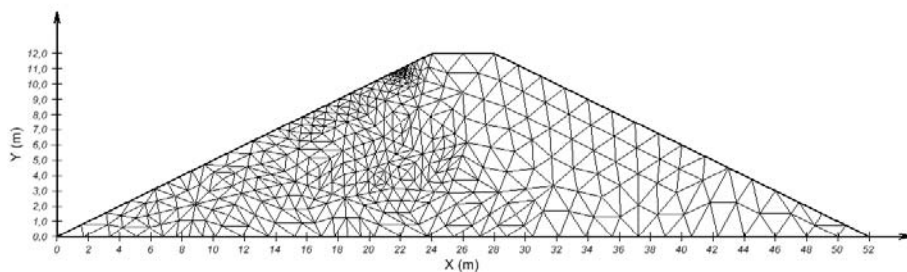
b)



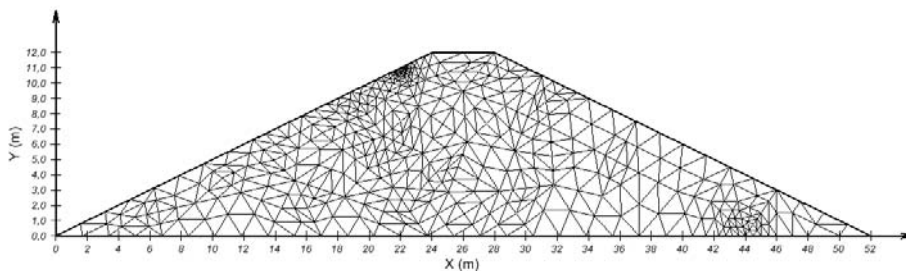
c)



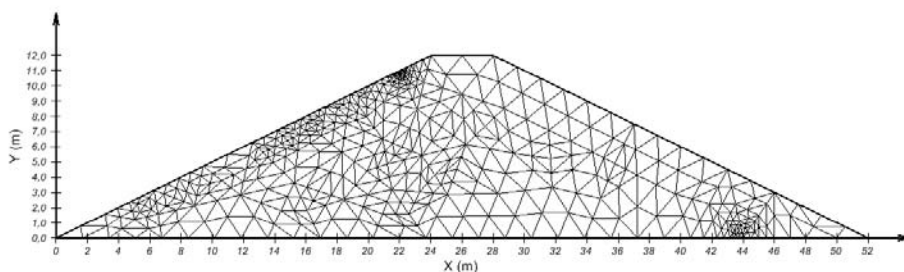
Figur 22 Visar portrycksnivåerna i banken för SvFlux. a) Efter fyllning av reservoaren b) Efter att reservoaren stått full 200 dagar c) Efter dränering.



Figur 23 Nätet i SvFlux vid 175 dagar.



Figur 24 Nätet i SvFlux vid 375 dagar.



Figur 25 Nätet i SvFlux vid 405 dagar.

I figur 24-26 syns hur nätet i SvFlux förändrats i nedre högra hörnet och längs vänster kant då grundvattenytan höjs och sprider sig.

6.2.7 Diskussion

Lösningarna följer varandra bra vid påfyllning och under tiden reservoaren står full. Dräneringen däremot skiljer sig åt en del mellan SEEP/W och SvFlux. SvFlux modell har dränerats snabbare längs med vänstra kanten än SEEP/W.

Nätets utseende skiljer sig åt mellan de två modellerna. För SvFlux varierar nätet allt efter lösningens gång. I SEEP/W har ett jämnstort nät angivits med storleken 1 m. Även med ett finare, jämnstort nät på 0,5 m mellan noderna blir lösningen likartad den tidigare.

För SvFlux bildar data för konduktiviteten en ojämn och hackig kurva. Varför anpassningen ser ut så är osäkert. Det har troligen bidragit till de skiljda resultat som nåtts.

Skillnaden i nät och tidssteg tillsammans med de något olika data för hydraulisk konduktivitet är troligen anledningen till att simuleringarna gett olika resultat för SEEP/W och SvFlux.

6.3 Pond infiltration

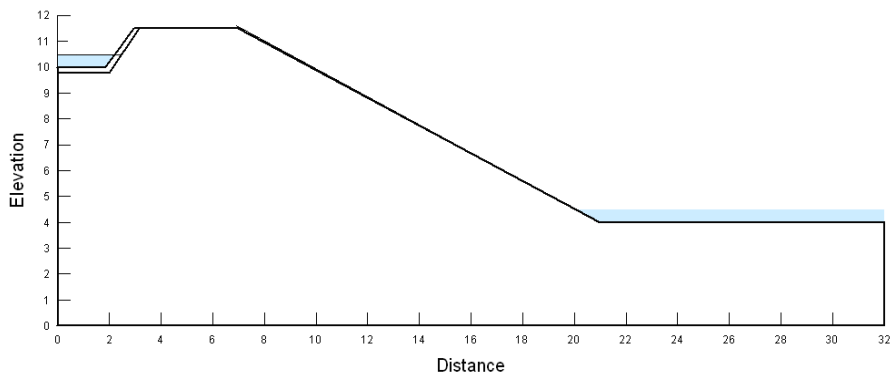
Det här exemplet illustrerar en liten damm högst upp i en backe som läcker vatten ner i en slänt. I slutet av slänten rinner en flod. Med hjälp av ett tätande lerskikt på botten av dammen är det meningen att förhindra att föroreningar i dammen når grundvattnet och floden.

Analysen görs i två steg, först en steady state för att ta fram startvärden för den tidsberoende analysen. I det första steget finns inte dammen ännu. En rent hydrostatisk tryckfördelning skulle ge ett portryck på -10 m i toppen av slänten. För att undvika att få orrealistiskt låga portryck överst i slänten har ett lätt regn lagts på över hela ytan.

Den tidsberoende analysen körs under 180 dagar och en utvärdering görs av hur grundvattenytan varierar under denna tid.

6.3.1 Geometri

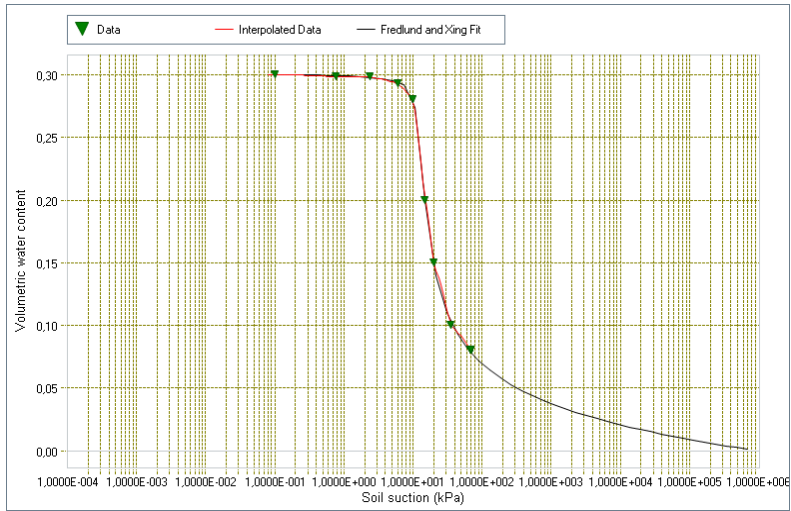
Slänten är 11,5 m som högst och lutar ner till 4 meter där den planar ut. Dammen är placerad på 10 m höjd. Lagret med lera i botten av dammen är 0,5 m tjockt.



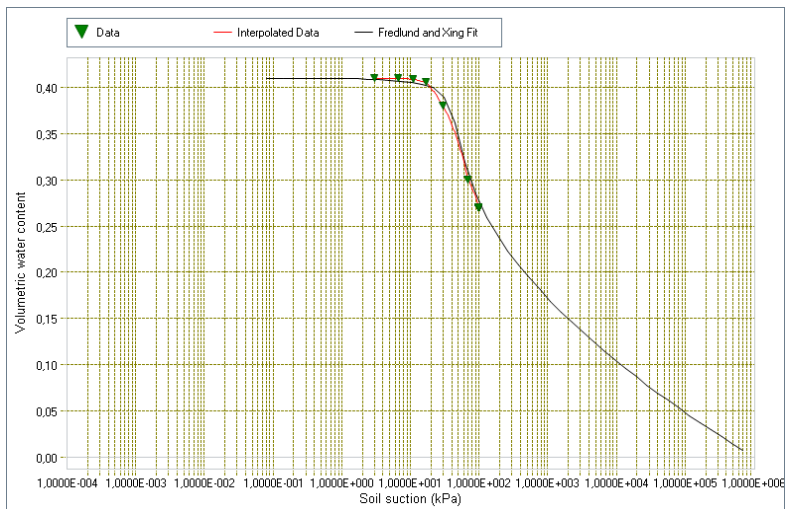
Figur 26 Geometrin för exempel Pond infiltration.

6.3.2 Materialegenskaper

I exemplet Pond Infiltration är de data som använts av SEEP/W inte speciellt utförliga. Endast 9 respektive 7 punkter har använts för att definiera vattenretentionskurvan för leran och banken. I SvFlux fungerar det inte att använda dessa data direkt. I SvFlux har Geostudios data därför anpassats till Fredlund och Xings ekvation för vattenretentionskurvan medan Geostudios data har använts utan anpassning i SEEP/W. Konduktivitetskurvan anges av de data som Geostudio använt i både SvFlux och SEEP/W. Se figur 27-29.

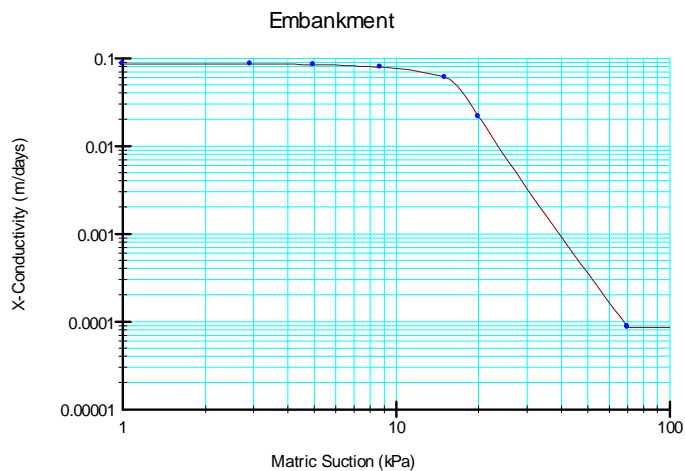


Figur 27 Vattenretentionskurvor för banken i exemplet Pondinfiltration med Fredlund och Xing anpassning och Geostudios datapunkter.

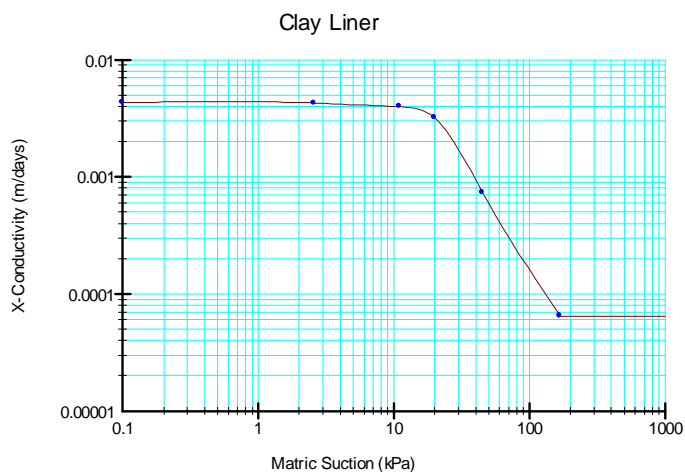


Figur 28 Vattenretentionskurvor för leran i exemplet Pondinfiltration med Fredlund och Xing anpassning och Geostudios datapunkter.

a)



b)



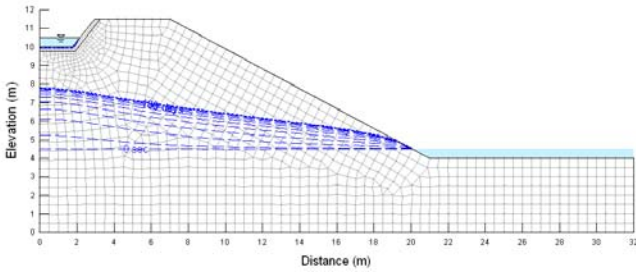
Figur 29 Hydraulisk konduktivitet till exemplet Pondinfiltration med Geostudios datapunkter, a – bank, b - lera.

6.3.3 Randvillkor

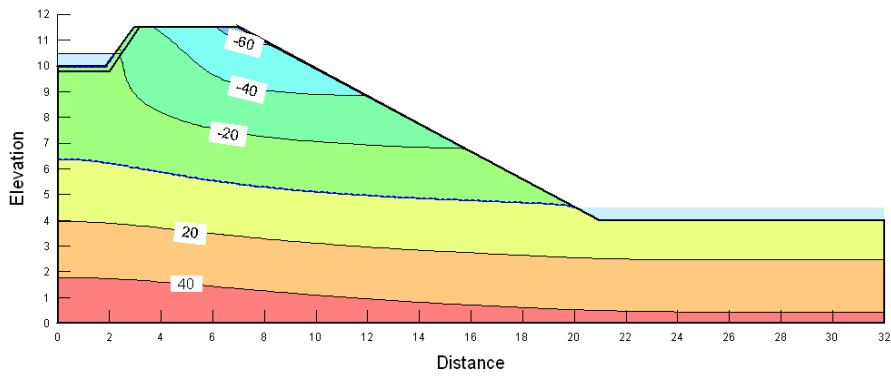
- Total tryck på 4,5 m anger floden som blir 0,5 m djup.
- Totaltryck på 10,5 m anger dammen som blir 0,5 m djup.
- Regnet anges som ett konstant flöde på 10^{-8} m/dag.
- På slänten anges regn på 10^{-8} m/dag med potentiellt läckage angivet.

6.3.4 Simulering med SEEP/W

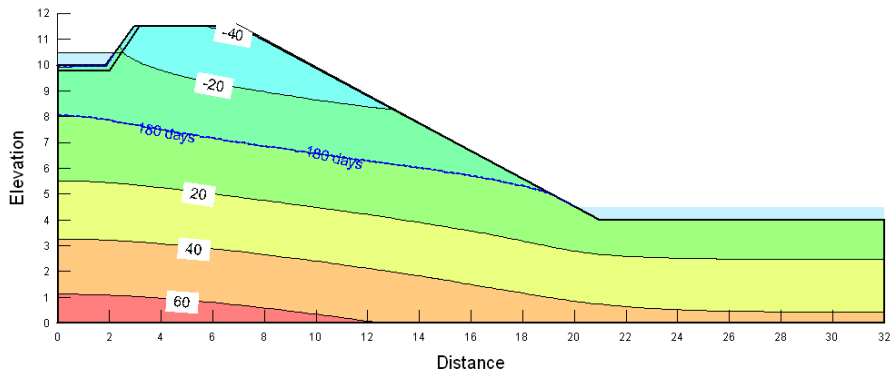
Current Elapsed Time: 180 days



Figur 30 Illustration av hur grundvattenytan varierar under de 180 dagar som simuleringen är gjord för.

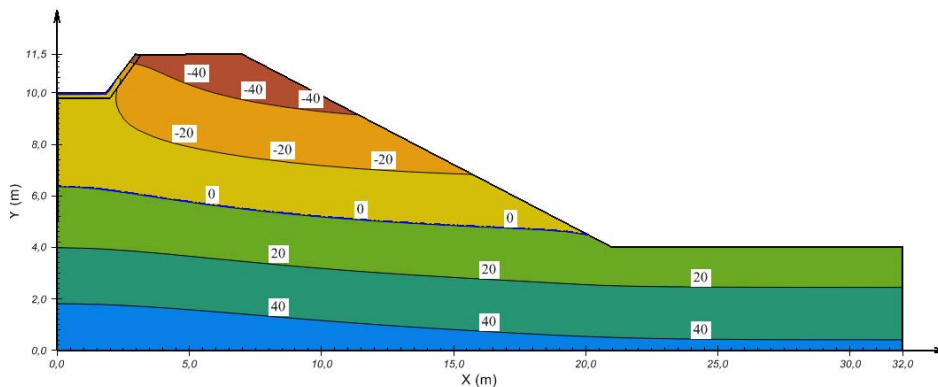


Figur 31 Portryck (kPa) för exempel Pond infiltration i SEEP/W, efter 36 dagar.

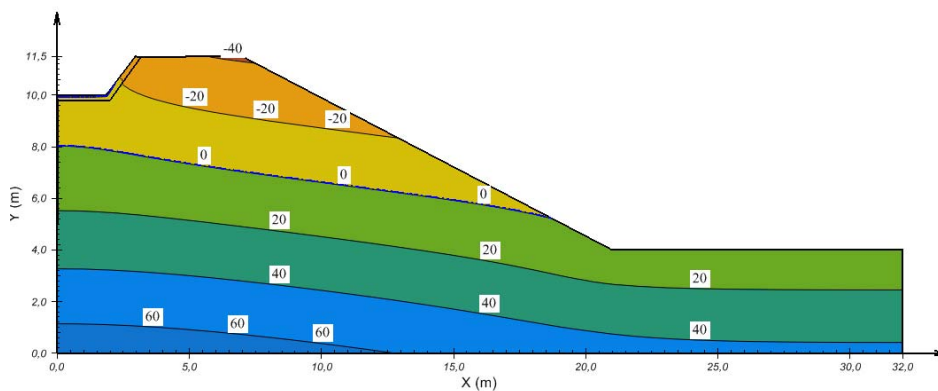


Figur 32 Portryck (kPa) för exempel Pond infiltration i SEEP/W, efter 180 dagar.

6.3.5 Simulering med SvFlux



Figur 33 Portryck (kPa) för exempel Pond infiltration i SvFlux, efter 36 dagar.



Figur 34 Portryck (kPa) för exempel Pond infiltration i SvFlyx efter 180 dagar.

6.3.6 Diskussion

I det här exemplet syns effekten av det täckande lerlagret i botten av dammen. Grundvattenytan stiger men relativt långsamt och den stannar två meter under dammen. En grundvattenyta bildas i lerlagret som är delvis mättat.

Resultaten överensstämmer väl mellan SvFlux och SEEP/W.

6.4 Parameterstudie

I den här studien har vattenretentionskurvan uppskattats med Van Genuchten's ekvation. Parametern n som påverkar lutningen på kurvan har varierats från 1,1 till 3,0 och porvattentryckets fördelning i slänten har utvärderats för de olika lutningarna på vattenretentionskurvan.

Modellen i studien består av en homogen slänt över vilken ett regn simulerats. Initialläget är en hydrostatiskt portrycksfördelning. Simuleringen har gjorts för 24 h. Därefter nås stabila förhållanden.

Grundvattenytan är fixerad i det här exemplet. Resultaten skiljer sig betydligt åt om den tillåts variera fritt eller är fixerad (Bertilsson 2010). En fixerad grundvattenyta kan motsvara en situation där grundvattenytan inte skulle påverkas av de förändringar som sker ovan marken på den modellerade ytan. Om grundvattenytan kommer att påverkas i ett verkligt fall beror av de hydrogeologiska förhållandena i ett större område omkring modellen.

Den här modellen är konstruerad som ett beräkningsexempel. Det regn som angivits är orimligt långt och intensivt. Det är inte heller troligt att hydrostatiskt tryck skulle råda genom hela slänten som angetts som startvärde. Resultaten kan därför inte anses spegla ett verkligt fall.

Presentation av resultaten har gjorts dels i bilder med fördelning av portrycken över modellen och dels med fördelningen av portryck längs ett snitt i slänten för respektive program.

6.4.1 Geometri

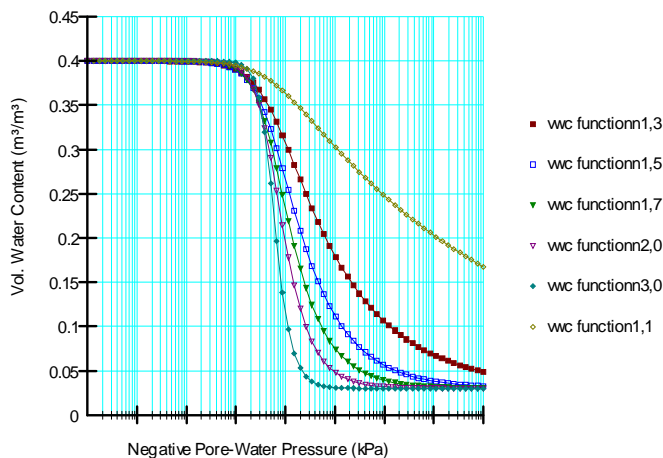
Slänten är 40 m hög och lutar 30° ner till 20m mellan $x=40$ m och $x=75$ m. Modellen är $100*40$ m stor, se figur 37.

6.4.2 Materialegenskaper

Slänten beskrivs med egenskaper som skulle kunna motsvara en siltjord med en mättad hydraulisk konduktivitet på 0,036 m/h och ett mättat vatteninnehåll på 0,4. Tabell 9 visar de värden som använts på n . Lutningen på kurvan regleras av parametern n och lägre värden ger en flackare kurva. Figur 36 illustrerar de vattenretentionskurvor som använts.

Tabell 9 Variation av parametern n

a	n	θ_s	θ_r
50	1,1 1,3 1,5 1,7 2,0 3,0	0,4	0,03



Figur 35 Vattenretentionskurvor med varierande n enligt tabell där $a=50$ kPa. Den översta kurvan motsvarar $n=1,1$, den nedersta $n=3,0$.

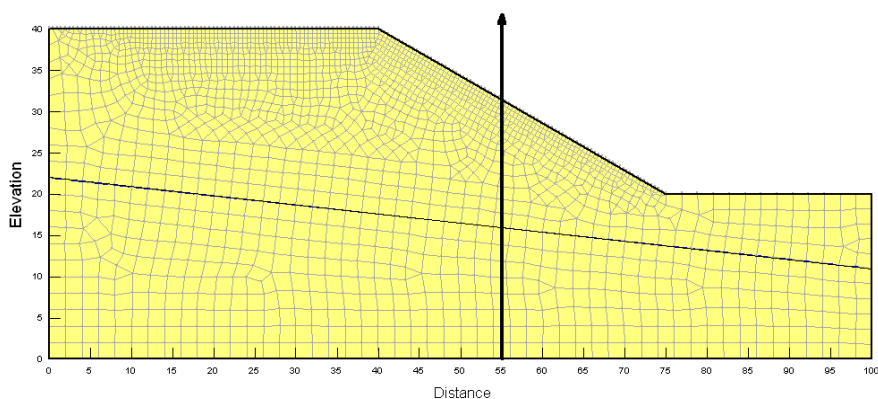
6.4.3 Randvillkor

Regnet som simulerats har samma intensitet som den mätade hydrauliska konduktiviteten, 0,036 m/h. Det har applicerats som ett konstant flöde under de 24 timmar som modellen körts. Villkoret *potential seepage review* har använts i SEEP/W. I SvFlux har ett konstant regn med avrinning angetts.

6.4.4 Simulering med SEEP/W

Nätet i SEEP/W består av 2234 noder. Den längsta lösningstiden som var för $n=1,1$ låg på 2 timmar. Övriga lösningstider låg från ett par minuter upp till 20 minuter.

Adaptive time stepping har använts. Vektornormen har utvärderats och max skillnad i portryck sattes till 2,5%. Tidsstegen tillåts variera i intervallet 0,01 till 1 h.



Figur 36 Nät och placering av utvärderingssnit

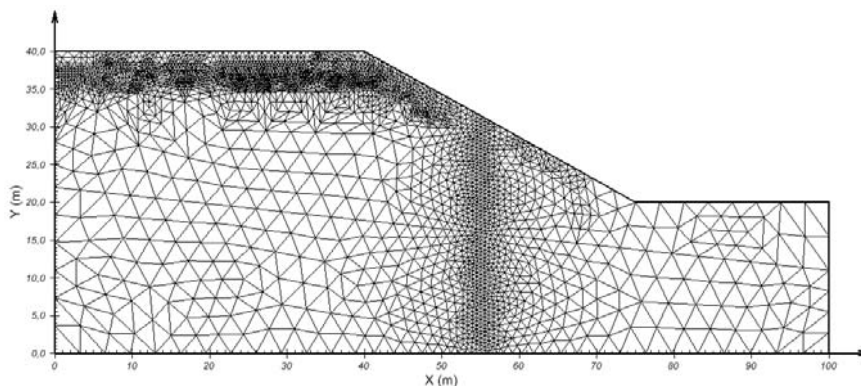
6.4.5 Simulering med SvFlux

För SvFlux har ett par olika varianter på konstruktion av nätet provats för att få så stabila värden som möjligt i kombination med rimliga lösningstider. De olika varianterna har provats för $a=50$ och $n=1,5$.

Det första försöket gjordes med förinställda värden för nätet. Med den automatiska nätgeneratoren i FlexPDE blev nätet väldigt glest över stora delar av modellen och mycket fint längs den varierande, övre, grundvattenytan. Det gav portryck som svängde mycket fram och tillbaka i övergången mellan hydrostatisk portrycksfördelning och ökningen av portryck nära ytan.

Därför gjordes på förslag av supporten en linje längs det snitt vid vilket portrycket utvärderas. Denna linje skapas i Soilvision med Model > Geometry > Feature. Längs linjen kan en specifik täthet för nätet anges. Solvern kommer då inte att göra nätet glesare än det valda värdet men möjligen tätare. Ett värde på 1 m valdes längs linjen. Detta tillägg gav mindre svängningar för porvattentrycken men något återstod fortfarande.

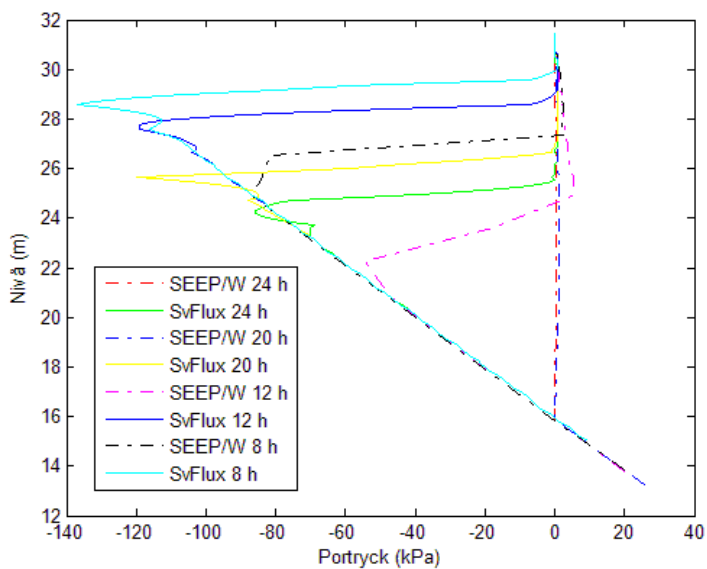
Det uppstod problem i SvFlux med RunOff-villkoret då den beräknade avrinningen fluktuerade väldigt mycket. På förslag från supporten minskades då intervallet inom vilket tidsstegen varierar och sattes till 0,01-0,05 h. Inställningarna för RunOff var 100 för faktorn och 1 kPa för transition width.



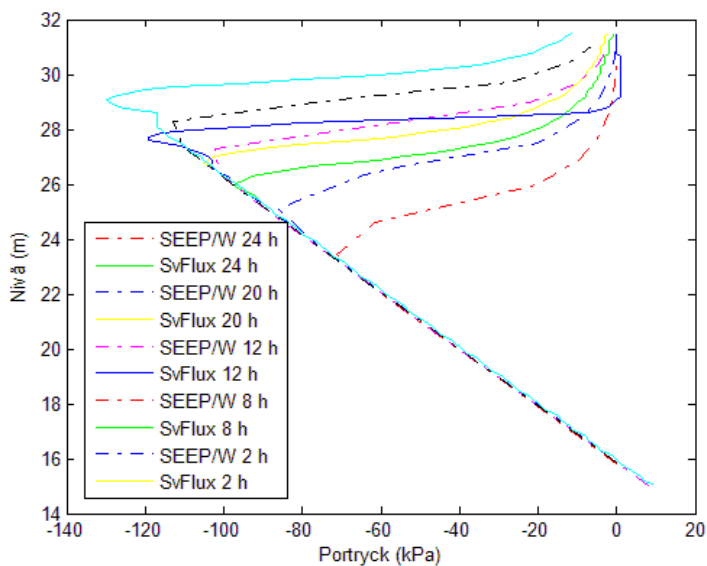
Figur 37 Nät i SvFlux efter 24 h, då $n=1,5$.

Tabell 10 Lösningstider och antal noder för SvFlux

	Lösningstid	Antal noder vid 24 tim
n 1,1	3 h 6 min	2534
n 1,3	2 h 47 min	2280
n 1,5	47 min	3132
n 1,7	39 min	2905
n 2,0	39 min	2994
n 3,0	59 min	2325

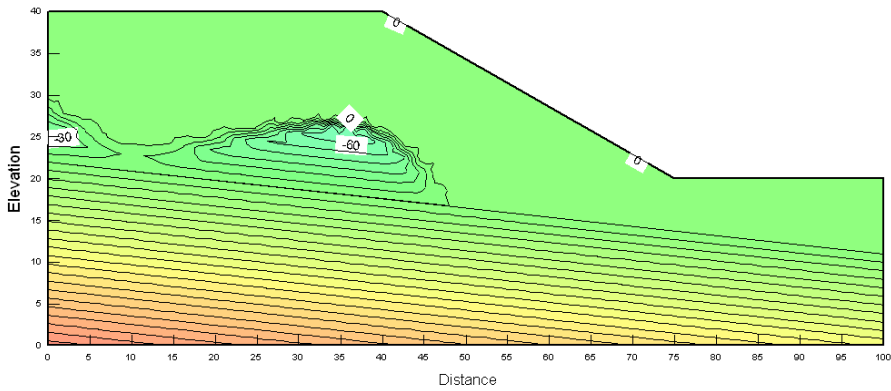


Figur 38 Portrycksfördelningen längs x=55 då n=1,1

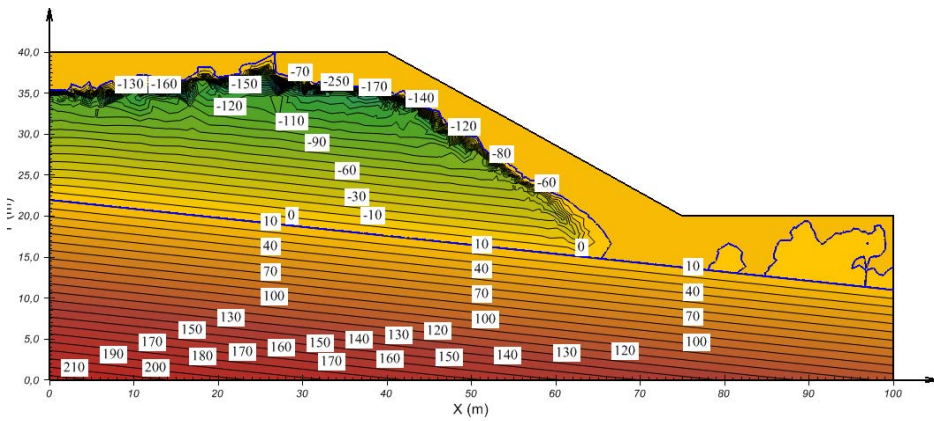


Figur 39 Portrycksfördelningen längs x=55 då n=1,7

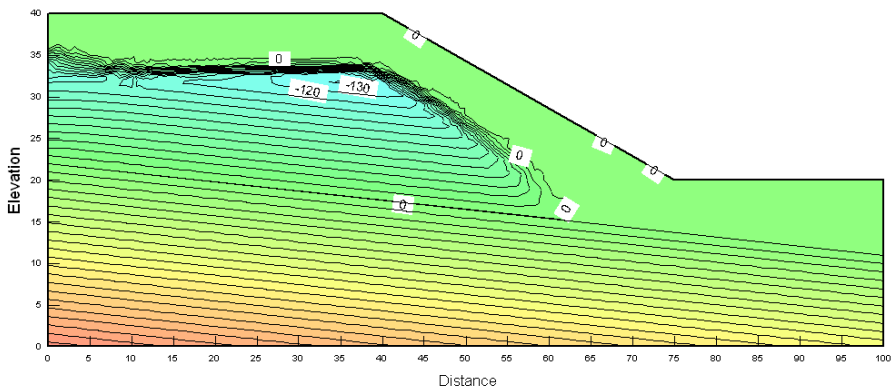
6.4.6 Resultat för SEEP/W och SvFlux



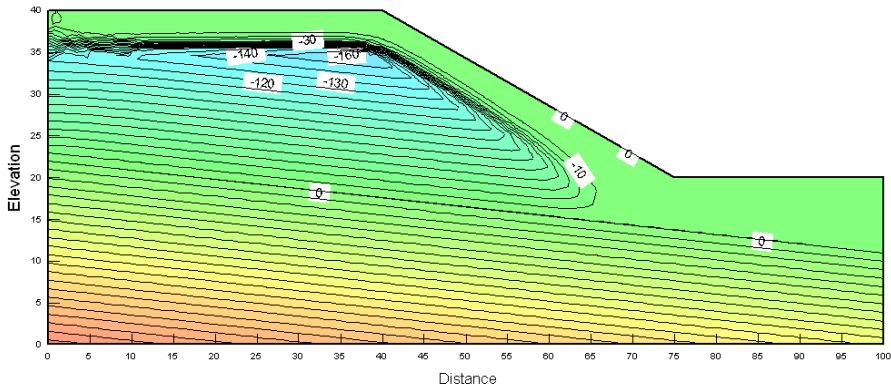
Figur 40 Porvattentryck (kPa) i SEEP/W efter 24 h med $n=1,1$



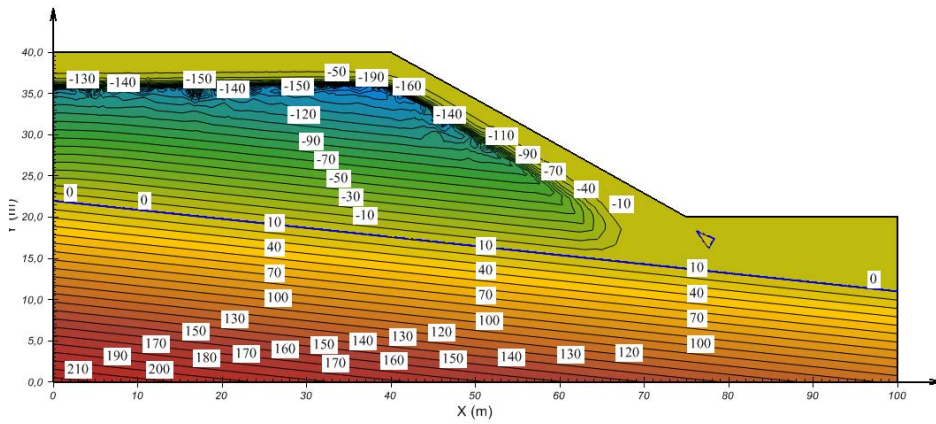
Figur 41 Porvattentryck (kPa) i SvFlux efter 24 h med $n=1,1$



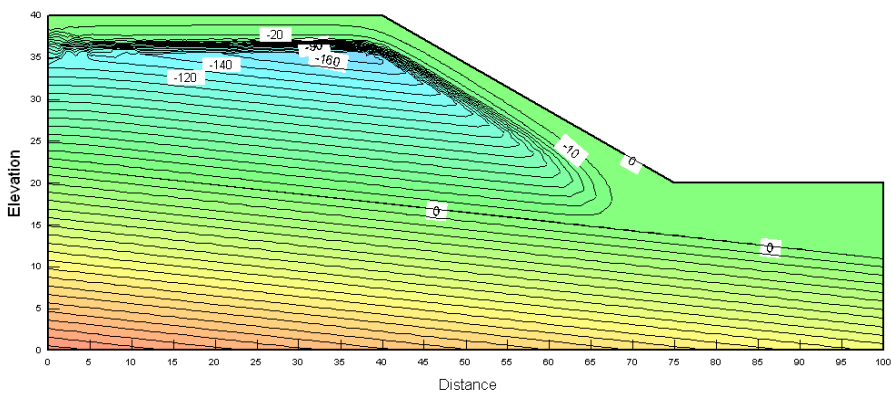
Figur 42 Porvattentryck (kPa) i SEEP/W efter 24 h med $n=1,3$



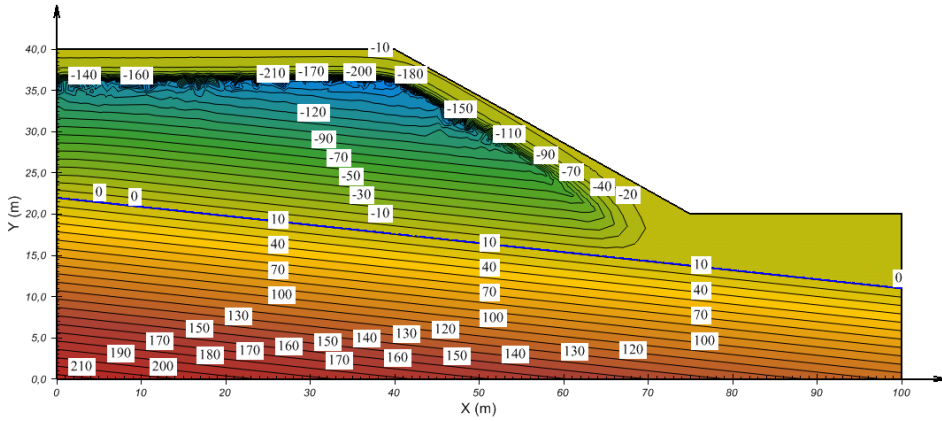
Figur 46 Porvattentryck (kPa) i SEEP/W efter 24 h med $n=1,7$



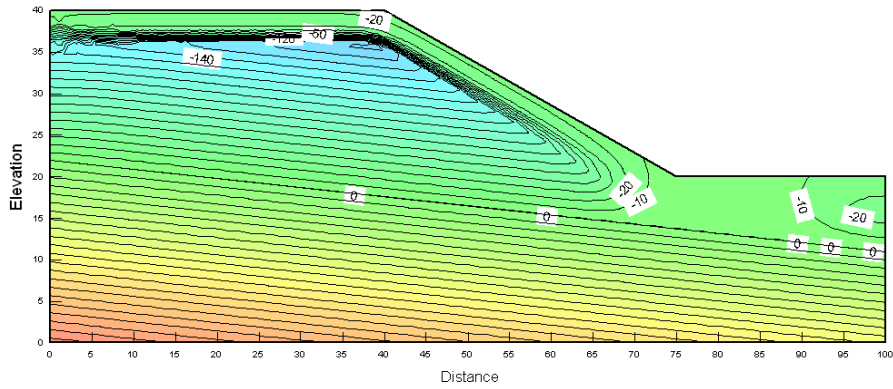
Figur 47 Porvattentryck (kPa) i SvFlux efter 24 h med $n=1,7$



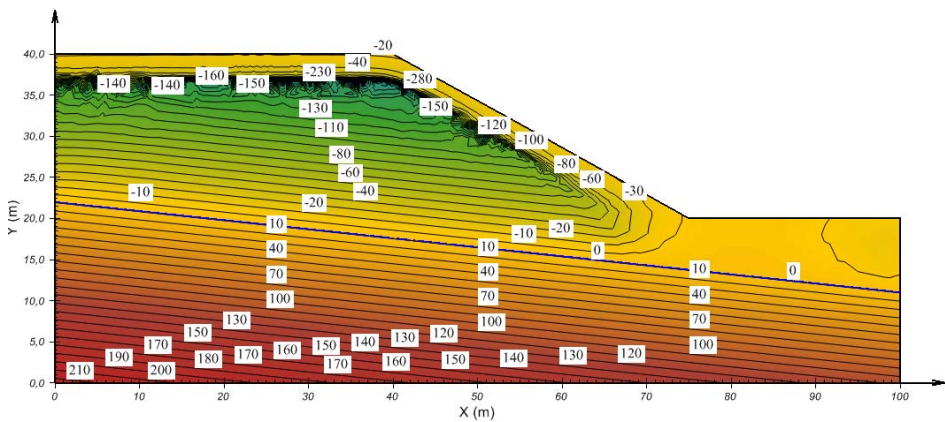
Figur 48 Porvattentryck (kPa) i SEEP/W efter 24 h med $n=2,0$



Figur 49 Porvattentryck (kPa) i SvFlux efter 24 h med $n=2,0$



Figur 50 Porvattentryck (kPa) i SEEP/W efter 24 h med $n=3,0$



Figur 51 Porvattentryck (kPa) i SvFlux efter 24 h med $n=3,0$

6.4.7 Diskussion

Under arbetet med den här modellen har det visat sig att resultaten varierar något mellan två väldigt lika och även helt lika filer. I det ena fallet ändrades inställningarna för vilka tidssteg som sparas för beräknade portryck. Det ledde till en något annorlunda lösning. Vid det andra tillfället kopierades filen med kommandot *save as*. När den kördes och resultaten jämfördes med originalet skiljde sig resultaten åt även om textfilen var exakt densamma.

Att två filer med samma kod ger olika porvattentryck förklaras av att den automatiska nätgeneratören och de automatiska tidsstegen inte ger exakt samma resultat varje gång den körs.

Att resultaten kan ändras med ändring av sparade tidssteg förklarades av supporten (Thode 2011) med den automatiska tidsstegsalgoritmen. Denna kommer att anpassas för att just de valda tidsstegen ska finnas med, vilket gör att övriga tidssteg förändras. Förändringen kan minskas genom att globala inställningar av tidsstegen som begränsar hur stora de får bli. Mindre tidssteg ger exaktare lösning men längre lösningstider.

Lösningstiderna för SvFlux är betydligt längre än för SEEP/W.

Resultaten för $n=1,1$ skiljer sig åt mellan programmen. Lösningstiderna var långa både för SEEP/W och för SvFlux. Lösningen för SEEP/W överensstämmer bättre med vad som kan förväntas ske då kurvorna för $n=1,3$ och $n=1,1$ i figur 35 studeras. Kurvan för $n=1,1$ är tydligt flackare vilket skulle innebära en långsammare sänkning av den hydrauliska konduktiviteten med ökat undertryck. Vattnet förväntas därför tydligt ha trängt längre ner i slänten under 24 h för fallet där $n=1,1$ än fallet där $n=1,3$.

De övriga resultaten verkar överensstämma mellan programmen.

7 Utvärdering

7.1 Möjligheter och begränsningar vid simulering

7.1.1 Geometri

SEEP/W

Arbetsfönstret har en bra struktur med ett Windows-liknande menysystem och ritverktyg.

Skalan på axlarna i SEEP/W måste definieras av användaren och anpassas inte automatiskt till modellen.

SvFlux

Geometrin är lätt att rita och det är smidigt att flytta runt i arbetsfönstret.

I SvFlux anpassas skalan på axlarna automatiskt efter modellen och kan sedan justeras i efterhand.

7.1.2 Randvillkor

SEEP/W

Potential seepage face review randvillkoret fungerar bra. Villkoret antar att allt vatten rinner av. Vad som saknas är möjligheten att ange avrinning med en specifik höjd för en ansamling av vatten på ytan.

Det går att ange randvillkor som en funktion i flera steg. Alternativt kan modellen byggas med hjälp av *parent analys system* så som det gjorts i Reservoar exemplet. Det senare är ett bra sätt att få översikt över olika steg i arbetet.

SvFlux

Det var problem med att få villkoret med avrinning att fungera utan stora fluktuationer i den beräknade avrinningen. Då *review boundary-villkoret* inte tillåter att nederbörd anges är användaren hänvisad till *climate managern* då nederbörd ska simuleras samtidigt som avrinning kan förväntas.

7.1.3 Materialegenskaper

SEEP/W

Då vattenretentionskurvan anges med Fredlund o Xings formulering i SvFlux så anger användaren ett värde på h_r , vilket motsvarar trycket då det kvarvarande vatteninnehållet nås. H_r är en parameter som används i den faktor vilken Fredlund och Xing lagt till ekvationen för att kunna styra den igenom ett maxtryck på 10^6 kPa. I SEEP/W finns inte möjligheten att definiera denna parameter.

SvFlux

Det går enkelt och fungerar bra att anpassa data till ett flertal olika modeller för vattenretentionskurvan. Det är praktiskt att ha en kurvanpassningsfunktion direkt i programmet istället för att göra anpassningen i ett separat program först.

7.1.4 Beräkningstider

SEEP/W

I de exempel som gjorts i den här rapporten har lösningstiderna varit korta för SEEP/W, oftast på ett par minuter.

SvFlux

Lösningstiderna i SvFlux är längre än i SEEP/W. För de inledande exemplen, Sandbox, Reservoar och Pond infiltration låg tiderna på knappt 10 minuter. I parameterstudien steg de upp till flera timmar för låga värden på n.

7.1.5 Import/export

SvFlux

Det är enligt Soilvision meningen att data ska kunna överföras från Geostudio till Soilvision. Det är vissa problem med detta som gör att det inte fungera bra i praktiken. Geometri och materialegenskaper kan överföras. Men materialegenskaperna blir inte rätt överförda, värdena stämmer inte med originalet.

Geometrier går bra att överför som DXF-format till och från SvFlux. Punktdata kan importeras från och exporteras till Excel

SEEP/W

Geometrier kan överföras i DXF-format till och från SEEP/W. Punktdata kan importeras från och exporteras till Excel

7.1.6 Rapportering

SEEP/W

En rapport kan genereras som tydligt beskriver hur modellen ser ut. Den är lätt att göra och kan spara mycket tid vid redovisning modellens konstruktion. Beräkningsresultaten visas inte i den generella rapporten.

SvFlux

En *run log* visar information om antal noder, lösningstider, beräknade fel m.m för varje tidssteg.

7.1.7 Visualisering

SEEP/W

Det är smidigt att ta fram grafer och bilder i SEEP/W.
Det går inte att skapa någon legend till bilderna i SEEP/W.

Det är lätt att visa iso-linjer från flera olika tidpunkter i samma bild vilket illustrerar förändringen under en tidsberoende analys på ett bra sätt.

SvFlux

I SvFlux måste önskade grafer väljas i förhand innan resultaten har visats. Det finns många valmöjligheter för varianter på grafer. Det är otydligt och tar tid att sätta sig in i hur det fungerar att ange vilken information som ska sparas till grafer.

En bra legend kommer upp automatiskt till bilderna i SvFlux.

7.1.8 Problem i SvFlux

Det har varit en del problem med att få bra tidssteg i SvFlux. Där det sker förändringar i modellen görs det anpassade nätet väldigt litet. Då tidsstegen anpassas efter nätet kommer dessa också att bli väldigt små.

I början av arbetet stöttes två buggar på i programmet. Det första gällde konvertering mellan de två olika sätten att ange kommatering (, .) vilken inte fungerade. Det åtgärdades till nästa version av SvOffice.

Det andra gällde övergången mellan steady state och transient modell. När en modell skulle konverteras gick den inte att köra efter konverteringen. Anledningen var att en av de inställda graferna från ursprungsmodellen, en mätning av flödet, inte konverteras till det nya formatet. Den måste tas bort manuellt för att det skulle fungera. Det här ska enligt supporten åtgärdas i kommande version.

Uppdateringar av SvOffice har kommit tre gånger under provtiden.

7.2 Användarvänlighet

7.2.1 SEEP/W

SEEP/W är lätt att komma igång med. Det finns flera välbeskrivna exempel och handboken är bra. Struktur och uppbyggnad av funktioner i programmet är logisk och tydlig.

Förutom de inläringsexempel, varav några använts här, finns handboken till SEEP/W och hjälpfunktionen i programmet som stöd vid arbetet med programmet. Hjälpfunktionen är praktiskt inriktad och beskriver vilken typ av information som ska fyllas i och hur man går till väga för att utföra specifika moment. Handboken är mer övergripande och beskrivande. I den beskrivs det hur SEEP/W utför olika kommandon och tips på hur man bör tänka när man jobbar med SEEP/W. Ofta hänvisar hjälpavsnitten till handboken för ett mer ingående resonemang över ex hur man ska bestämma vilka värden som ska användas.

Handboken heter *Seepage Modeling with SEEP/W, an engineering methodology*. Den är välskriven och tydlig. Även hjälpavsnitten som finns till programmet är lättlästa och informativa.

Supporten fungerar bra.

7.2.2 SvFlux

Det tar tid att få överblick över hjälpmaterialet till SvFlux och de olika program som samverkar med SvFlux; SvOffice, FlexPDE och Acumesh. De olika delarnas funktion, vad som hittas var är otydligt.

Till SvFlux följer ett antal hjälpmanualer:

- SvOffice - innehåller två böcker, med var sin innehållsförteckning, något som inte står i början utan man märker först då man börjar bläddra. De två är *SvOffice user's manual* och *Acumesh – user's manual*.
- Soilvision - innehåller tre böcker, vilket står på ett försättsblad men inte på utsidan. Det är *User's manual*, *Tutorial manual* och *Theory manual*.
- SvFlux - innehåller tre böcker, angivet på utsidan. Det är *User's manual*, *Tutorial manual* och *Theory manual*.

I hjälpavsnittet som är kopplat till programmet finns SvOffice *user's manual* och *tutorial manuals* för de olika programmen i Office sviten, däribland SvFlux.

Handböckerna innehåller många upprepningar, har en otydlig struktur och är trots det stora antalet sidor inte så informativa som man skulle önska.

Även om många filer med olika exempel följer med SvOffice finns det bara ett par exempel för SvFlux med beskrivningar till.

SvFlux innehåller en hel del detaljerade valmöjligheter, vilket kan ge en bra flexibilitet för användaren. Så som det upplevts här har det mest bidragit till att göra det svårare att överblicka.

Supporten till SvFlux har varit mycket hjälpsam. De svarar snabbt och är tydliga bra i sina formuleringar.

7.3 Utvärdering av Midas GTS

Lika mycket tid har lagts på inläring av SvFlux som av Midas GTS. På den tiden har flera exempel kunnat lösas i SvFlux medan det inte har gått att komma så långt på motsvarande tid med Midas GTS. Då den handbok som fanns tillgängliga innehöll lite information om just flödesanalyser och det exempel som funnits först inte gick att öppna i programmet har det gjort inläringen mer beroende av supporten. Kommunikationen med supporten har varit ganska svår.

Support och instuderingsmaterial:

- Supporten – Svarar direkt. Konversationen har inte varit helt enkel då den innehållit av ett par missförstånd och att vissa frågor inte besvarats alls.
- Instruktionsmaterial
 - Handbok i form av fyra PDF filer vid namn *Analysis case*, *Finite element formulation*, *Constitutive model*, *Numerical analysis*. Av dessa totalt drygt 400 sidor är det 12 som rör flödesanalys specifikt. Där beskrivs de ekvationer som används för FEM formuleringen, vattenretentionskurvan och den hydrauliska konduktiviteten beskrivs generellt.
 - Verifikations exempel – reservoar som där Midas GTS jämförde med resultat från SEEP/W
 - Övningsexempel – det fanns inget exempel där hydraulisk konduktivitet och vattenretention angavs som funktioner.
 - Hjälpsnitt i programmet – fungerade.

Exempel på problem vid arbetet med Midas GTS:

- Licens – problem med web-registreringen vid två tillfällen.
- Nätet - Materialegenskaperna i Midas GTS anges tillsammans med nätet. Ett nät definieras för varje område och till detta sätts materialegenskaperna. Det innebär att nätet måste anges för varje område. Fler inställningar måste göras för att få nätet att fungera.
- Material - För exemplet Sandbox togs en rimlig lösning fram då materialegenskaperna angavs som konstanter men inte då punktdata eller ekvation angavs.
- Flera gånger har ett felmeddelande kommit upp som löst sig helt enkelt genom att modellen sparats i en ny fil med nytt namn.
- Uppdatering till vers 1.1 2011. Uppdateringen gjorde att flera dokument som delades med supporten inte kunde öppnas. Till uppdateringen följde enligt supporten fler exempel som var tillgängliga, vilka inte kunde hittas.
- Det är svårt att få överblick över vad som angetts i modellen. När en fil öppnas är det svårt att förstå hur man gör för att se vilka randvillkor som angivits och var.

Diskussion

Det går inte att göra en fullständig bedömning av programmet på den tid och tillgång på information som funnits för det här projektet. Det som kan sägas är att i jämförelse med de två andra program som provats i projektet så var Midas GTS inte lätt att sätta sig in i. Det har lite fokus på just flödesproblem under omättade förhållanden vilket var det specifika intresseområdet för den här utvärderingen.

Supporten har försäkrat att de har kunder som använder denna del av programmet professionellt. De har också redovisat jämförelse med resultat från SEEP/W vilka har god överensstämmelse. Därför måste slutsatsen vara att det går att använda Midas GTS för att beräkna flödesproblem men att startsträckan är lång.

8 Slutsats

8.1 *Rekommendationer*

Under den tid SvFlux använts har flera nya versioner med mindre ändringar hunnit komma. Ett par buggar har påträffats under arbetet varav en del åtgärdats i senare versioner. Det verkar som att SvFlux är ett program i utveckling och att det fortfarande har en bit kvar innan det känns stabilt att arbeta med.

Programmet är ambitiöst uppbyggt med en stor mängd valmöjligheter på alla områden på vad gäller byggandet av modellen och inställningar av beräkningsalgoritmer.

Tyvärr har det en spretig struktur med flera olika program som handskas med olika delar av simuleringsarbetet. Det tar tid att sätta sig in i och känns en smula mer invecklat än det behöver vara.

Möjligen kommer SvFlux att utvecklas och vara mer stabilt och användarvänligt inom några år. Då kan det vara ett bra alternativ till SEEP/W särskilt för användare som är specialiserade inom området och vill ha möjlighet att göra manuella inställningar som inte är möjliga i SEEP/W

I nuläget upplevs SEEP/W som ett mer lättanvänt arbetsverktyg för den som vill utföra simuleringar av negativa portryck.

8.2 *Framtida arbete*

För den här rapporten har ett par veckors tid kunnat ges för att arbeta med varje programvara. För en noggrannare utvärdering skulle mer tid behöva läggas på arbete med vart och ett av de undersökta programvarorna.

För en djupare utvärdering av programmen skulle utöver de problemställningar som provats här följande saker vara intressant att undersöka:

- Hur fungerar det att använda framtagna värden för portrycken i SvSlope respektive SLOPE/W för att utföra stabilitetsanalyser?
- Klimatvillkor kan anges i både SEEP/W ihop med AIR/W och i SvFlux climate managern. Hur fungerar det i de båda programmen?
- Som komplement till SvFlux hade det varit intressant att närmare studera databasen Soilvision något som inte rymts inom ramen för det här projektet.

9 Referenser

- Axelsson K (2005), 'Introduktion till geotekniken', Inst. För geovetenskaper, Byggteknik, Uppsala universitet, kap 7.3-7.4.
- Bear J. (1979), 'Hydraulics of groundwater', McGraw-Hill International Book Co., New York.
- Bertilsson R. (2010), 'Kapillära egenskaper och siltslänters stabilitet, del 1 – Känslighetsanalys av de kapillära egenskapernas inverkan på slänters stabilitet', Statens geotekniska institut, Intern rapport 9.
- Brooks, R. J., and A. T. Corey (1964), 'Hydraulic properties of porous media', *Hydrol. Pap.* 3, Colorado State University, Fort Collins.
- Chui T.F.M., Freyberg D.L., 'The Use of COMSOL for Integrated Hydrological Modeling', Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Corresponding author: maychui@stanford.edu.
- Fredlund, D. G., Xing, A. (1994), 'Equations for the soil-water characteristic Curve', *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 3, 521-532.
- Fredlund D.G. (2006). 'Unsaturated soil mechanics in engineering practice', *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, American society of civil engineers, 132:3, 286-321.
- Ezziyani S., Holmén M (2009), 'Metod för bestämning av vattenretentionsegenskaper', SGI, Linköping.
- Knutsson S., Larsson R., Tremblay M., Öberg-Högsta A-L. (1998). 'Siltjordars egenskaper', *Information 16*, SGI, Linköping.
- Krahn J. (2004), 'Seepage Modeling with SEEP/W, an engineering methodology', Geo-Slope international, Canada, 2004.
- Larsson R. (1995). 'Jordmaterialet silt - geotekniska egenskaper och deras bestämning', *Rapport 49*, SGI, Linköping.
- Lu N., Likos W. J. (2004), 'Unsaturated soil mechanics', John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- Rulon, J. J., Freeze R. A. (1985), 'Multiple seepage faces on layered slopes and their implications for slope-stability analysis' *Canadian Geotechnical Journal*, 22, 347- 356.
- SEEP/W 2007, 'Seepage Modeling with SEEP/W 2007, an engineering methodology', 4:e upplagan, Geo-Slope international, Canada, 2010.
- Sällfors G.(2001), 'Geoteknik', Göteborg.
- Thode R., Fredlund M. (2008), 'SvOffice 2009 user's manual', Soilvision Systems Ltd., Saskatchewan, Canada.
- Thode R. (2008), 'SvFlux verification manual', Soilvision Systems Ltd., Saskatchewan, Canada.
- Thode R., Gitiriana G. (2008), 'SvFlux theory manual', Soilvision Systems Ltd., Saskatchewan, Canada.
- Van Genuchten, M. T. (1980), 'Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils'. *Soil Science Society of America Journal*, 44:5,892-898.
- Öberg A.-L., Sällfors G. (1995), 'A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils.' *Proc. of the 1st International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, 151-157.
- Öberg A.-L. (1997), 'Matrix suction in silt and sand slopes, significance and practical use in stability analysis.' Department of geotechnical engineering, Chalmers.

Support

Thode R, 2011-05-31, rob@soilvision.com.

Internet

Vicaire, *Virtual campus in hydrology and water resources*, <http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/>, senast ändrad 2006-03-09.

1. modul 3, kapitel 2.1.4, hämtad 2010-09-07
2. modul 3, kapitel 2.3, hämtad 2010-09-07
3. modul 3 kapitel 4.2 hämtad 2010-09-07
4. modul 3, kapitel 4.3, hämtad 2010-09-07

LTH, *avdelningen för Teknisk vattenresurslära*,

<http://www.tvrl.lth.se/fileadmin/tvrl/files/vvr111/Hydrologi/Grundvatten.pdf>, senast ändrad 2008-09-25, hämtad 2011-05-21.

UNSODA, <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8967>, hämtad 2011-06-17.

Geostudios exempel,

<http://www.geo-slope.com/support/geostudio2007/examples>