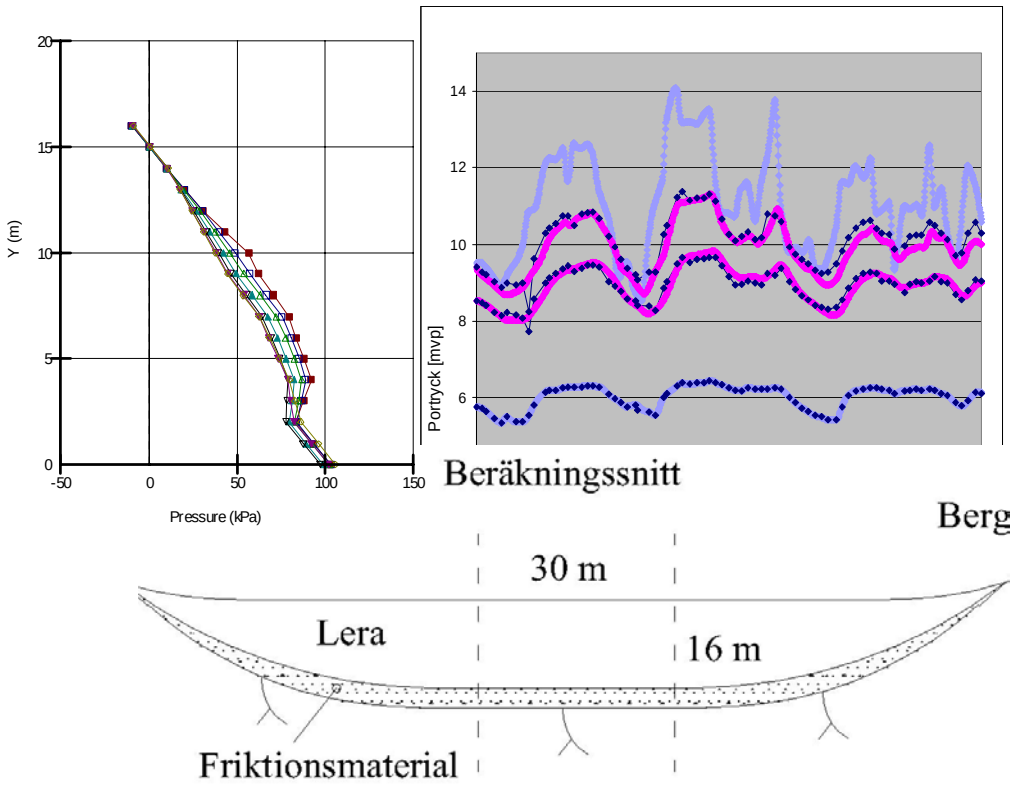
CHALMERS



Portrycksvariationer i leror

– Simulering av portrycksvariationer i leror underlagrade av friktionsmaterial

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg och Vatten

NIKLAS FORSMOO

HENRIK ISAKSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargruppen geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2007:120

EXAMENSARBETE 2007:120

Portrycksvariationer i leror

– Simulering av portrycksvariationer i leror underlagrade av friktionsmaterial

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg och Vatten

NIKLAS FORSMOO

HENRIK ISAKSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargruppen geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2007

Portrycksvariationer i lera
– Simulering av portrycksvariationer i leror underlagrade av friktionsmaterial
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg och Vatten
NIKLAS FORSMOO
HENRIK ISAKSON

© NIKLAS FORSMOO HENRIK ISAKSON 2007

Examensarbete 2007:120
Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargruppen geoteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Chalmers Reproservice/ Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2007

Variations of pore pressure in clay
- Simulation of variations of pore pressure in clay with underlying till
Master's Thesis in Civil and Environmental Engineering
NIKLAS FORSMOO HENRIK ISAKSON
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of GeoEngineering
Research group Geotechnical Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Precipitation can lead to increased pore pressure in slopes of clay, which reduces the stability. This means that slopes, which are stabile today, can fail if new extreme levels of pore pressure evolve due to increased precipitation. When it comes to slopes consisting of clay with underlying till, variations in pressure in the till can occur, which are connected to precipitation. Under these circumstances, additional precipitation can cause increased water pressure in the till. If the pressure in the till is elevated the pressure is spread up to the overlying clay, which means that it is of great interest to examine how this spread of pressure occurs.

To examine how well it's possible to simulate spread of pressure upwards in a clay profile, simulations have been made for areas where great measurements in pore pressure have been made. At the simulations the computer program SEEP/W has been used. For the examined areas pore pressure measurements have been made during several years on different levels in the clay profile, plus in the underlying till. Variations in pore pressure in the tilt have been used as initial value at the simulations in SEEP/W to examine how these variations affect the pore pressure in the clay profile. Simulations have also been made, which regards increased precipitation and how it increases the pressure in the soil.

Examinations have also been made to see how increased pore pressures affect the slope stability, and how different ways of defining the pore pressure affected the result at the calculations of the stability. At the examination of the stability of the slope calculations with the computer programme SLOPE/W were made.

Key words: Clay, pore pressure, SEEP/W

Portrycksvariationer i lera
– Simulering av portrycksvariationer i leror underlagrade av friktionsmaterial
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg och Vatten
NIKLAS FORSMOO
HENRIK ISAKSON
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargruppen geoteknik
Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

Nederbörd kan leda till höjda portryck i lerslänter vilket i sin tur reducerar hållfastheten. Detta innebär att slänter som är stabila idag kan gå till brott om nya extrema portrycksnivåer uppstår tillföljd av ökad nederbörd. För slänter bestående av lerjord med underlagrande friktionsjord kan tryckvariationer i friktionsjorden förekomma som är kopplade till nederbörden. Detta medför att ökad nederbörd kan ger upphov till ökat vattentryck i friktionsmaterialet. Om trycket i friktionsmaterialet höjs sprids trycket upp till den överlagrade leran vilket innebär att det är av stort intresse att undersöka hur denna tryckspridning sker.

För att undersöka hur väl det går att simulera tryckspridningar uppåt i en lerprofil har simuleringar gjorts för områden där omfattande portrycksmätningar har utförts. Vid simuleringarna har datorprogrammet SEEP/W används. För de undersökta områdena har portrycksmätningar gjorts under flera år på olika nivåer i lerprofilen samt i det underlagrande friktionsmaterialet. Tryckvariationerna i friktionsmaterialet har använts som ingångsdata vid simuleringarna i SEEP/W för att undersöka hur dessa variationer påverkar portrycket i lerprofilen. Det har även gjorts simuleringar som beaktar ökad nederbörd och hur det höjer tryck i jorden.

Undersökningar gjordes även för att se hur höjda portryck påverkar släntstabiliteten samt hur olika sätt att definiera portrycket påverkade resultatet vid stabilitetsberäkningar. Vid undersökningarna av släntstabiliteten gjordes beräkningarna med datorprogrammet SLOPE/W.

Simuleringarna av hur trycket sprids uppåt i leran från ett underlagrande friktionsmaterial visade sig vara mycket komplexa. Det gick inte att helt simulera portrycken så att de var överensstämmande med de uppmätta värdena på samtliga nivåer. De absoluta trycknivåerna gick att simulera relativt bra men det var inte möjligt att fullt ut simulera årstidsvariationerna på samtliga nivåer. Vid simuleringarna i SEEP/W visade det sig att den hydrauliska konduktiviteten främst styr trycknivåerna och kompressionsmodulen främst påverkar fluktuationerna. Detta är en avvikelse från svensk beräkningspraxis där det inte påverkar om det är den hydrauliska konduktiviteten eller kompressionsmodulen som ändras eftersom de multipliceras i formeln för konsolideringskoefficienten (c_v). En svaghet som uppdagades med SEEP/W var att enbart en kompressionsmodul kan anges vid beräkningarna. Detta ger ofta upphov till ett fel eftersom simuleringar vanligtvis

berörs av flera moduler, ibland både M_0 och M_L, men oftast en av dem och avlastningsmodulen.

Vid undersökningarna av hur sättet att definiera portrycken inverkar på stabilitetsresultatet framgår det att resultaten blir tydligare och mer information erhålls om portrycken importeras från SEEP/W där de först simulerats. Att använda SEEP/W är dock mer tidskrävande än att definiera portrycken direkt i SLOPE/W. Sättet som portrycken definieras på bör därför grundas på hur mycket information som krävs vid undersökningen. Skall t ex känslighetsanalyser genomföras är SEEP/W mycket användbart där det dels kan undersökas hur mycket portrycken kan öka innan en slänt går till brott samt få en uppfattning om hur länge portrycken måste vara höga för att det ska ske.

Nyckelord: Lera, portryck, portrycksvariation, SEEP/W

Innehåll

ABSTRACT I

SAMMANFATTNING II

INNEHÅLL IV

FÖRORD VII

BETECKNINGAR VIII

1 INLEDNING 1

1.1 Bakgrund 1

1.2 Syfte och avgränsningar 1

1.3 Mål 1

2 KLIMATET FÖRÄNDRAS 2

3 PARAMETRAR SOM PÅVERKAR EN JORD 4

3.1 Yttre påverkan av hållfasthet 4

3.1.1 Vattentryckets påverkan på hållfastheten 4

3.1.2 Nederbörds påverkan på grundvatten- och porvattentryck 6

3.2 Jordegenskaper 7

3.2.1 Hydraulisk konduktivitet 7

3.2.2 Kompressionsmodul 8

3.2.3 Skjuvhållfasthet 9

4 MJUKVARA 11

4.1 SEEP/W 11

4.1.1 Beräkningsmetod 12

4.2 SLOPE/W 13

4.2.1 Beräkningsmetod 14

5 MODELLERING 16

5.1 Verifiering av SEEP/W 16

5.1.1 Jämförelse Helenelunds metod och SEEP/W 16

5.1.2 Känslighetsanalys 17

6 FALLSTUDIER 19

6.1 Korpemyren 19

6.1.1 Arbetsgång 20

6.1.2 Resultat 22

6.2 Yxan 28

6.2.1 Arbetsgång SEEP/W 28

6.2.2 Resultat SEEP/W 30

6.2.3 Arbetsgång SLOPE/W 35
6.2.4 Resultat SLOPE/W 38

7 DISKUSSION 40

8 SLUTSATSER 42
8.1 SEEP/W 42
8.2 SLOPE/W 43

9 FÖRSLAG TILL FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR 44

10 REFERENSER 45

Bilagor

Jämförelse Helenelunds metod och SEEP/W Bilaga 1

Beräkning Helenelunds metod Bilaga 2

Uppmätt vattentryck för Korpemyren Bilaga 3

Spänningsdiagram för Korpemyren Bilaga 4

Spänningsdiagram för Yxan Bilaga 5

Förord

Föreliggande rapport behandlar portrycksvariationer i leror. Uppmätta portryck över tiden jämförts med simulerade portryck, där simuleringarna har utförts med hjälp av datorprogrammet SEEP/W.

Arbetet utfördes under hösten och vintern 2006/2007 på geoteknikavdelningen på institutionen för Bygg- och Miljöteknik vid Chalmers tekniska högskola. Handledning gavs av doktorand Håkan Persson och examinator var biträdande professor Claes Alén.

Först vill vi tacka vår handledare Håkan Persson för ett stort engagemang. Diskussioner och kommentarer såväl vid datorsimuleringar som vid rapportskrivning har varit värdefulla.

Vi vill också passa på att tacka Jenny Persson, doktorand på geoteknikavdelningen, som var till stor hjälp vid användandet av datorprogrammet SEEP/W, men även för de värdefulla kommentarer som hon gett oss under arbetets gång.

Slutligen ett stort tack till BohusGeo, framförallt Per-Gunnar Larsson och Mats Falck, som har bistått med ovärderligt material vid de båda fallstudierna.

Beteckningar

Romerska bokstäver

c	Kohesion [kPa]
$c´$	Kohesion med avseende på effektivspänning [kPa]
F	Säkerhetsfaktor vid beräkning av släntstabilitet [-]
h	Skillnad i tryckhöjd [m]
H	Total tryckhöjd [mvp]
i	Hydraulisk gradient [m/m].
k	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
k_x	Hydraulisk konduktivitet i x-riktning [m/s]
k_y	Hydraulisk konduktivitet i y-riktning [m/s]
l	Strömningsväg [m]
m_w	Lutning på lagringskapacitetskurva
M	Kompressionsmodul [kPa]
n	Porositet [-]
q	Specifikt flöde [m/s]
Q	Definierat flödesvillkor [m^3/s]
S	Vattenmättnadsgrad [-]
t	Tid [s]
u	Portryck [kPa].
w_L	Flytgräns för lera [-]

Grekiska bokstäver

$d\varepsilon$	Förändring av töjning
$d\sigma´$	Förändring av effektivspänning

ϕ Inre friktionsvinkel [º]

ϕ' Inre friktionsvinkel med avseende på effektivspänning [º]

ε Deformation [-]

θ Volymetriskt vatteninnehåll (Volumetric water content) [-]

μ Reduktionsfaktor [-]

σ Spänning [kPa]

σ' Effektivspänning [kPa]

σ_0 In situ spänning [kPa]

σ'_0 In situ effektivspänning [kPa]

σ'_c Förkonsolideringstryck [kPa]

τ Skjuvspänning [kPa]

τ_f Skjuvspänning (fallkonförsök) [kPa]

τ_{fu} Odränerad skjuvhållfasthet [kPa]

τ_v Skjuvspänning (vingsondering) [kPa]

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Idag finns det stora osäkerheter vad gäller nederbördens påverkan på jordslänter. Eftersom klimatet håller på att förändras med en ökning av nederbörd som följd ökar även behovet av förståelse kring dessa problem. För att uppskatta maximalt portryck som kan uppstå i en slänt finns rekommendationer från bl.a. Skredkommissionen. Undersökning av dessa prognosmetoder pågår för tillfället som ett doktorandprojekt på SGI/Chalmers.

Hur portryckssituationen ser ut i en slänt har stor betydelse för släntstabiliteten. Kunskapen om hur denna påverkas av olika jordlagerföljder samt förändringar i randvillkor (d.v.s. nederbörd, infiltration, ändrad vattennivå i angränsande vattendrag m.m.) är dock inte tillräcklig. Därför bör dessa samband studeras närmare.

1.2 Syfte och avgränsningar

Syftet med föreliggande rapport har varit att undersöka hur portrycken i en lerprofil påverkas av tryckförändringar i ett underlagrande friktionsmaterial. Rapporten behandlar även hur höjda portryck påverkar släntstabiliteten, samt hur olika sätt att definiera portrycken kan inverka på beräkningsresultatet för stabiliteten. De undersökningar som gjorts behandlar enbart lerprofiler underlagrade av friktionsmaterial.

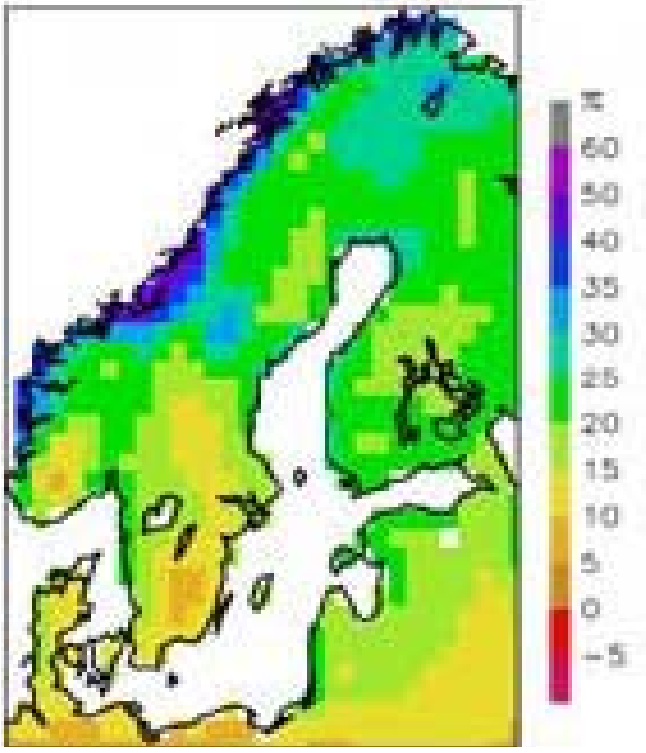
1.3 Mål

Målet med denna rapport har varit att analysera om möjlighet finns att simulera fram portryck i en jordprofil som stämmer överens med uppmätta portryck över tiden. För att göra detta har datorprogrammet SEEP/W använts. Det har även varit av intresse att analysera slänter hållfasthet och hur den minskar vi höjda portryck.

2 Klimatet förändras

Det globala klimatet håller på att förändras där det tydligaste tecknet är ökningen av jordens medeltemperatur. Denna utveckling har pågått i flera sekel enligt SMHI (2007a), men uppvärmningen har accelererats de senaste decennierna på ett alarmerande sätt. Den globala medeltemperaturen har ökat med 0,6˚C det senaste seklet enligt IPCC (2001). Temperaturökningen verkar bero på ökning av växthusgaser, som finns i atmosfären. På grund av svårigheter att på kort tid reducera utsläppen kommer enligt framtida klimatscenarier gjorda av SMHI (2007b) ökningen av medeltemperaturen att fortsätta i flera årtionden.

En ökning av medeltemperaturen medför en större avdunstning samtidigt som en varmare atmosfär kan innehålla mera vatten, leder till extrema vädersituationer enligt IPCC (2002). Förändring av vattnets kretslopp leder till häftigare regnoväder som återkommer oftare samt även hårdare och oftare förekommande stormar. Dessa extrema vädersituationer, som uppkommer på grund av klimatförändringen, kan på sikt få konsekvenser med drastiska följder. De klimatscenarier som SMHI gjort, pekar på att vid år 2100 har till exempel nederbörden ökat med 20-30 % i västra Sverige, se Figur 2.1.



Figur 2.1 Ökning av nederbörd för Sverige år 2071-2100 (SMHI 2007c).

Eftersom nederbördstrenden tyder på intensivare och/eller längre varaktigheter för nederbördstillfällena medför detta en rad konsekvenser. Redan nu har det visat sig hur känsligt samhället är för de extrema klimatsituationer som hittills har uppkommit. Där det mest påtagliga kanske är det ökade antalet översvämningar. Hösten 2006 var det stora översvämningar i Göteborg där områden utmed Mölndalsån och Säveån var värst drabbade. Efter stora nederbördsmängder steg vattennivån i dessa vattendrag till extrema nivåer, se Figur 2.2.



Figur 2.2 Sävedalen under vatten på grund av översvämning i Säveån

När Mölndalsån steg hamnade delar av Mölndal under vatten. Det tog flera veckor för vattnet att sjunka undan så pass att till exempel spårvagnarna och trafiken kunde flyta på som vanligt.

Den ökade nederbördsmängden innebär också att vatteninnehållet ökar i marken. Detta medför att de extrema nederbördsmängderna kan få dramatiska konsekvenser i form av skred. I december 2006 inträffade ett skred i Småröd utanför Munkedal där en sträcka på 500 meter av väg E6 försvann och nederbörden kan ha varit en bidragande orsak, se Figur 2.3.



Figur 2.3 Skred vid Småröd, Munkedal där E6:an följde med i rasmassorna

3 Parametrar som påverkar en jord

För att få bättre förståelse för beräkningar och resultat har inverkande hållfasthetsparametrar beskrivits. Vattenhalten, som beror på infiltrationen av nederbörden, påverkar effektivspänningarna i jorden. Den hydrauliska konduktiviteten tillsammans med kompressionsmodulen avgör hur snabbt nederbörden infiltreras samt hur tryckvariationerna i det underlagrande friktionsmaterialet sprider sig uppåt i lerprofilen. Vidare är den dränerade skjuvhållfastheten beroende av effektivspänningarna i jorden.

3.1 Yttre påverkan av hållfasthet

Vattentrycket har stor betydelse för hållfastheten för jordar. Vattentrycket i sin tur beror på nederbörden, där en ökad nederbörd ger ett ökat vattentryck.

3.1.1 Vattentryckets påverkan på hållfastheten

Jorden består vanligtvis av korn, vatten och gas där kornen bildar ett skelett som bär upp de laster som belastar jorden. Mellan kornen finns det hålrum, porer, som är fyllda med antingen vatten, gas eller en blandning av båda (Sällfors 2001).

När en jord belastas är det viktigt att förstå sambandet mellan jordens totala spänning, den spänning som bärs upp av kornskelettet, effektivspänningen, samt portrycket. Detta samband definieras enligt

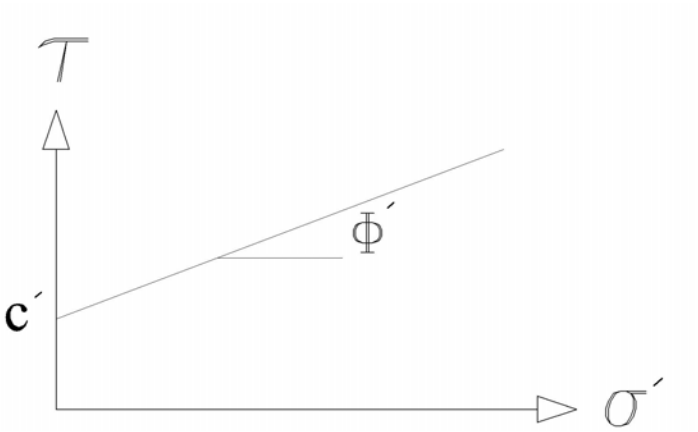
$$\sigma = \sigma' + u \tag{3.1}$$

där σ = totalspänning [kPa]
σ' = effektivspänning [kPa]
u = portryck [kPa].

Hållfastheten för jord delas ofta upp i dränerad och odränerad hållfasthet. När en jord utsätts för deformation så snabbt att vattnet inte hinner avgå talar man om odränerat brott och odränerad hållfasthet, vilken är oberoende av effektivspänningarna enligt Ekvation 3.2. Denna brottyp är främst aktuellt för kohesionsjordar eftersom det tar längre tid innan vattnet pressas ur en finkornig jord. Om det däremot sker förändring av portrycket talar man om dränerat brott och dränerad skjuvhållfasthet. Detta gäller främst för friktionsjordar men även för kohesionsjordar när långtidspåverkan beaktas. Den dränerade skjuvhållfastheten beskrivs ofta enligt Mohr-Coulombs ekvation, som när den beror på effektivspänningen definieras

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\phi' \tag{3.2}$$

där parametrarna åskådliggörs i Figur 3.1.



Figur 3.1 Skjuvhållfasthetens förändring med ökad effektivspänning enligt Mohr-Coulomb

där τ_f = skjuvhållfastheten [kPa]
c' = kohesion [kPa]
σ' = effektivspänning [kPa]
ϕ' = inre friktionsvinkel [º]

Dessa ovan beskrivna ekvationer visar att om vatteninnehållet ökar i en jord, dvs. vatten- eller portrycket ökar, minskar jordens dränerade skjuvhållfasthet. Denna minskning beror på att kornskelettet tar upp mindre andel av totalspänningen genom att kontakttrycket mellan kornen minskar. När den dränerade skjuvhållfastheten minskar innebär det att en slänts stabilitet minskar, vilket kan medföra att en slänt går till brott (Sällfors 2001).

I Sverige är det vanligt att relativt täta jordar, kohesionsjordar, har ett underlagrande skikt av en mera genomsläpplig jord, friktionsjord. Vattentrycket i detta friktionsmaterial kan vara artesiskt (övertryck), vilket innebär att tryckhöjden är ovan marknivå. Trycket i friktionsjorden kan även variera på grund av nederbördsmängden och intensiteten. Vid de prognostiserade ökningarna av nederbördsmängd och intensitet som gjorts av SMHI ökar risken för höga tryck i friktionsmaterialet. När denna tryckökning sprids upp genom leran medför det ökade portryck, och som påvisades ovan, en lägre dränerad skjuvhållfasthet. Detta ger i förlängningen större risk för att slänter går till brott.

För slänter där det finns skikt av friktionsjord i lerprofilen ökar risken för att den dränerade skjuvhållfastheten minskar. Speciellt farligt är det om skiktet har hög konduktivitet och är vattenförande, eftersom det medför ett ökat vattentryck i friktionsmaterialet. Även denna tryckökning fortplantas i lerjorden med tiden, vilket leder till högre portryck med minskad hållfasthet som följd. De farligaste fallen med ett vattenförande friktionsmaterial är när skiktet ligger på ett sådant djup att en eventuell glidyta tangerar det eller ligger nära det. Detta på grund av tryckökningar i skiktet då får större inverkan på portrycken utmed glidytan, vilka är helt styrande för stabiliteten.

3.1.2 Nederbörds påverkan på grundvatten- och porvattentryck

Vid nederbörd kommer vattnet att infiltreras vilket gör att markens vattenmättnadsgrad ökar. All nederbörd infiltreras dock inte på grund av evapotranspiration och interception. Evapotranspiration är summan av evaporation som är avdunstning från våta ytor, samt transpiration som är när vatten avges genom växternas klyvöppningar i bladen. Interception innebär att all nederbörd inte kommer ned till marken utan istället fastnar i vegetation för att därifrån avdunstas (Grip & Rodhe 2000).

Andelen av nederbörd som infiltreras bestäms av olika faktorer såsom nederbördens varaktighet och intensitet, andel hårdgjorda ytor, markstuktur, jordmånstyp, vattenmättnadsgrad, samt genom jordlagrens hydrauliska konduktivitet (Knutsson & Morfeldt 1995). När nederbördsmängden överskrider infiltrationskapaciteten blir det vatten som inte kan infiltreras stående på ytan och det bildas ytavrinning (Grip & Rodhe 2000).

Vid stationärt tillstånd i marken då grundvattentrycket enbart är beroende av avståndet från grundvattenytan dvs. om ett portrycksrör placeras på ett visst djup ställer vattnet i röret in sig i samma nivå som grundvattenytan, kallas det hydrostatisk jämvikt. För att ett flöde i grundvattnet skall kunna ske krävs en skillnad i tryckhöjd, vilken gör att vattnet strömmar i potentialgradientens riktning. Detta kan uppstå genom att vattentrycket ändras till följd av nederbörd, avdunstning eller en yttre förändring av grundvattenbalansen (Knutsson & Morfeldt 1995). Mättade och omättade vattenflöden i marken beskrivs av Darcy´s lag, vilken beskriver hur flödet mellan två närliggande punkter i marken är proportionell mot potentialskillnaden mellan punkterna.

Storleken på grundvattenytans fluktuationer beror på hur genomtränglig markytan är samt den omättade zonen mäktighet. Störst orsak till grundvattenytans fluktuation har infiltrationsområdets storlek och utseende. Tiden det tar för en ”vattendroppe” att transporteras i marken kan ta lång tid vid låg hydraulisk konduktivitet, medan tryckvariationerna kan ske snabbt. Orsaken till detta är en tryckfortplantning enligt Knutsson & Morfeldt (1995). I framförallt västra Sverige är det vanligt förekommande med berg-i-dagen som ger upphov till stor ytavrinning som kan infiltreras snabbt i det friktionsjordslager som ofta finns mellan berget och den överlagrande leran (Berntson 1983).

Akvifer kallas en geologisk bildning som innehåller grundvatten. Man skiljer på två typer av akvifer, öppen och sluten. I en öppen akvifer står grundvattnet i direkt vertikal kontakt med atmosfären. I denna typ fastställs grundvattenytan som det tryck som är lika med atmosfärstrycket, dvs. vattenytan sammanfaller med grundvattenzonens övre gräns (Grip & Rodhe 2000). När det gäller en sluten akvifer är grundvattnet avskiljt från atmosfären med ett tätt eller nästan tätt överlagrande jordlager. Den tillhörande trycknivå som vattnet stiger till om det täta jordlagret genomträngs, kallas piezometriska grundvattenytan (Knutsson & Morfeldt 1995).

Som påpekats ovan är grundvattentrycket viktigt att fastställa för att öka säkerheten hur portrycksprofilen i en lera ser ut, som är avgörande för en slänts hållfasthet (vid dränerad analys). Portrycksprofilen varierar med årstidsfluktuationer samt från år till år. Eftersom det sällan finns tillgång till långtidsobservationer när en

släntstabilitetsanalys skall göras medför detta att prognoser måste göras med hjälp av korta observationer, ofta enbart på några månader (Skredkommissionen 1995). Sveriges geologiska undersökning, SGU, har ett antal referensrör utplacerade i grundvattennät för vilka det finns långtidsobservationer. De observationer som gjorts för slänten jämförs sedan med observationerna för närmaste referensrör.

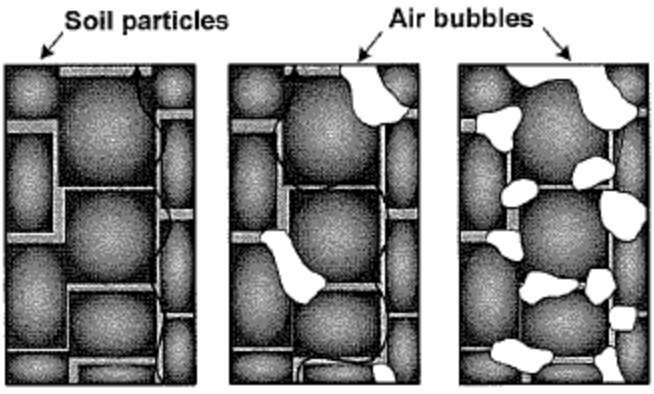
3.2 Jordegenskaper

För en jord är det vissa parametrar som avgör hur stabil en jordslänt är. De olika parametrarna är hydraulisk konduktivitet, kompressionsmodul och skjuvhållfastheten.

3.2.1 Hydraulisk konduktivitet

En jordarts materialspecifika förmåga att släppa igenom vätska uttrycks genom dess permeabilitet. Den beror av materialets porositet, struktur, lagerföljd och mängden inneslutande luft. Permeabiliteten kan även variera i olika riktningar (Knutsson & Morfeldt 1995). Till exempel för skiktad lera är den horisontella permeabiliteten större än den vertikala, på grund av att leran har avsatts i skikt. När hänsyn tas till vätskans egenskaper såsom täthet, viskositet och temperatur, används begreppet hydraulisk konduktivitet.

För att det skall vara möjligt för jorden att transportera vatten krävs det att porerna innehåller vatten. Störst konduktivitet för en viss jord är då hela porvolymen är vattenfylld, dvs. mättad konduktivitet. Den mättade konduktiviteten ökar med porernas storlek som beror av kornstorleken (Grip & Rodhe 2000). När en jord torkar töms porerna på vatten, se Figur 3.2. De största porerna töms först vilket medför att konduktiviteten minskar väldigt snabbt i början, på grund av att de innehåller störst andel vatten, och sedan de minsta som bidrar till ett mindre flöde.



Figur 3.2 Flödesmöjlighet i ett material när vatteninnehållet minskar Krahn (2004a). I den mittersta bilden har gas bildats i porerna vilket innebär stor minskning av flödet. Detta tillstånd kallas AEV, Air Entry Value.

När jorden är omättad finns det såväl vatten som gas i porerna. För att definiera när gas bildas i porerna, vilket innebär stor minskning av flödet, används begreppet AEV, Air Entry Value, se Figur 3.2. För en friktionsjord minskar flödet tvärt när det övergår från mättat till omättat, medan för lera är flödesminskningen gradvis avtagande.

I den övre delen av en lerprofil kan det vid uttorkning uppkomma vertikala sprickor. Enligt Berntson (1983) kan de vertikala sprickorna sträcka sig ned till 5 meter, i västra Sverige har fall med vertikala sprickor ned till 10 meter registrerats. I dessa lerlager sker tryckförändringarna förhållandevis snabbt eftersom sprickorna ger upphov till ett hydrostatiskt tillstånd. Sprickorna är svåra att upptäcka i laboratorieförsök eftersom det vid försöken i regel pressas samman. Detta medför att det kan vara svårt att förklara hur portrycksförändringen fortgår i verkligheten utifrån laboratorieförsök vid dessa förhållanden.

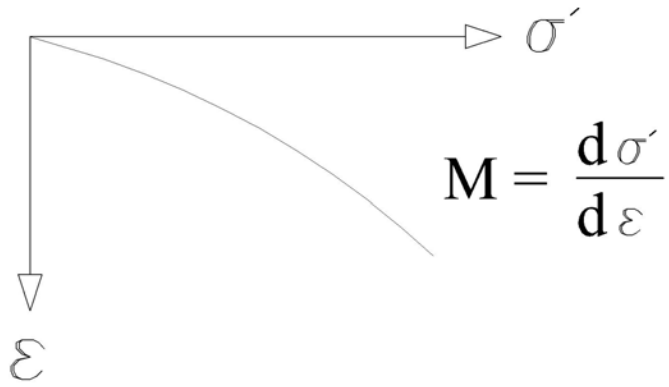
3.2.2 Kompressionsmodul

Kompressionsmodulen, M, beskriver en jords vertikala deformationsegenskaper och används inom geotekniken främst vid sättningsberäkningar. För att bestämma modulen belastas ett jordprov vertikalt. Men modulen påverkar även hur snabbt en tryckförändring sprider sig i en lerprofil, där tryckförändringen sker snabbare för en högre modul. Detta beror på att för ett styvt kornskelett utvidgas inte porerna lika mycket som för ett mindre styvt kornskelett. Modulen bestäms genom

$$M = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \tag{3.3}$$

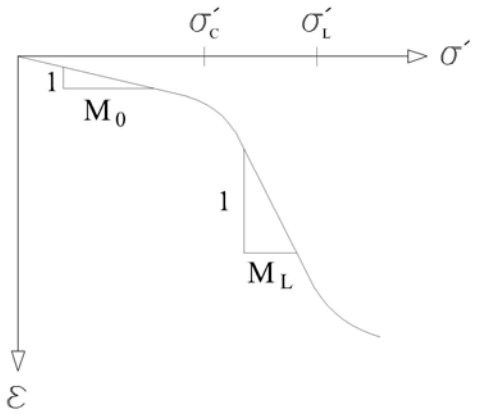
där M = kompressionsmodul
$d\sigma'$ = förändring av spänning
$d\varepsilon$ = förändring av töjning.

Resultatet av laboratorieundersökningar plottas i ett spännings-töjningsdiagram, se Figur 3.3, där kompressionsmodulen är derivatan av σ´-ε-kurva.



Figur 3.3 Given kompressionsmodul för ett ödometerförsök

I denna rapport behandlas enbart kompressionsmodulen för lera, som när ett prov deformeras med en konstant hastighet i ett så kallat CRS-försök, ger ett spännings-töjningssamband enligt, se Figur 3.4.



Figur 3.4 Generellt spännings-töjningssamband för lera vid ett CRS-försök

Vid denna försökstyp skall provet vara ensidigt dränerat och försett med en portrycksmätare vid den odränerade sidan. Under försöket registreras påförd kraft, deformation och portryck, vilket innebär att effektiv vertikalspänning och kompression kan fastställas.

Eftersom det inte är enkelt att beskriva kurvan med ett matematiskt samband delas den upp i tre intervaller, där modulen motsvarar lutningen på kurvan. Intervallet $<\sigma'_C$ ger M_0, σ'_C-σ'_L med tillhörande modul M_L samt $>\sigma'_L$ där $M = M_L + (\sigma'-\sigma_L)M'$, där M' är derivatan av kurvan (Sällfors 2001).

Vanligt förekommande är att utvärderade värden för modulen vid överkonsoliderad lera blir lägre än vad som är fallet för in situ-förhållanden varför de utvärderade värdena bör ökas med en faktor tre till fem. Detta på grund av olika faktorer vid laboratorieförsöken enligt Berntson (1983). Till exempel beräknas M_0 innan god anliggning sker av stämpel mot provet samt att provet inte har stabiliserats.

Det är viktigt att utvärdera vilken spänningssituation som råder för jorden. När en jords effektivspänning in situ är lägre än förkonsolideringstrycket σ'_C, kallas det att jorden är överkonsoliderad. Är däremot effektivspänningen lika med förkonsolideringstrycket, $\sigma'_0=\sigma'_C$, är leran normalkonsoliderad. För en överkonsoliderad lera är kompressionsmodulen avsevärt större än för en normalkonsoliderad för att leran varit utsatt för högre effektivspänning och tidigare komprimerats. Detta medför att tryckvariationer sprids mycket snabbare i en överkonsoliderad lera vilket innebär att det är av stort intresse att klargöra spänningsförhållandet för att kunna förstå och beskriva portryckssituationen i jorden.

3.2.3 Skjuvhållfasthet

En slänts stabilitet beror av skjuvhållfastheten, ju högre desto stabilare. Bestämning av skjuvhållfasthet kan göras både genom laboratorieförsök och in situ-försök, där vingsondering är den vanligaste metoden. Det finns även andra in situ-metoder som används alltmer för att tolka skjuvhållfastheten, som till exempel pressometerförsök, dilatometerförsök och spetstrycksondering (Sällfors 2001).

Man skiljer på odränerad och dränerad skjuvhållfasthet. För friktionsjordar som har en hög permeabilitet används nästan alltid dränerad analys. När det gäller kohesionsjordar används båda beräkningssätten.

3.2.3.1 Dränerad skjuvhållfasthet

Friktionsjordar, som har en hög permeabilitet, kan oftast betraktas som dränerade. Laboratorieförsök på friktionsjordprover görs nästan alltid som konsoliderade, dränerade försök. Hållfasthetsparametrarna utvärderas genom att analysera effektivspänningarna och parametrarna betecknas c´ och ϕ' där ´ visar att de är utvärderade med avseende på effektivspänningarna, se Ekvation 3.2. Leror som är överkonsoliderade kan antas dränerande på grund av att inom det överkonsoliderade området sker portrycksförändringar snabbt (Berntson 1983).

3.2.3.2 Odränerad skjuvhållfasthet

Kohesionsjordar har relativt låg permeabilitet vilket innebär att det krävs lång tid att dränera jordprovet. I naturen kan ett belastningsfall behandlas som om dränering inte hinner ske. Därför kan det sägas att analysen skall betraktas som odränerad och vid en sådan analys betraktas jordprovets volym som konstant.

För att fastställa den odränerade skjuvhållfastheten för lera används olika in situ-metoder, men det finns även enklare metoder som är mindre tidskrävande såsom fallkonförsök.

När flytgränsen w_L blir uppåt 100 %, vilket påvisar att det finns organiskt material i jorden, finns det risk för att den odränerade skjuvhållfastheten överskattas. För att ta hänsyn till detta reduceras skjuvhållfastheten med avseende på flytgränsen med korrektionsfaktorn μ, som definieras

$$\mu = \left(\frac{0{,}43}{w_L} \right)^{0{,}45} \tag{3.4}$$

där w_L = flytgräns för lera [%].
Skjuvhållfastheten reduceras enligt

$$\tau_{fu} = \mu * \tau_f \tag{3.5}$$

$$\tau_{fu} = \mu * \tau_v \tag{3.6}$$

där τ_{fu} = odränerad skjuvhållfasthet [kPa]
τ_f = skjuvspänning (fallkonförsök) [kPa]
τ_v = skjuvspänning (vingsondering) [kPa].

4 Mjukvara

När det gäller strömningsrelaterade beräkningar används datorprogrammet SEEP/W och för stabilitetsberäkningarna SLOPE/W. Dessa programverktyg är tillverkade av Geostudio, där den stora fördelen är möjligheten att länka en beräkning av till exempel portryck gjorda i SEEP/W till SLOPE/W för stabilitetsberäkning.

4.1 SEEP/W

SEEP/W är ett modelleringsprogram som använder finita element-metoden för att behandla flödesrelaterade problem. Programmet behandlar en rad tekniska problem så som:

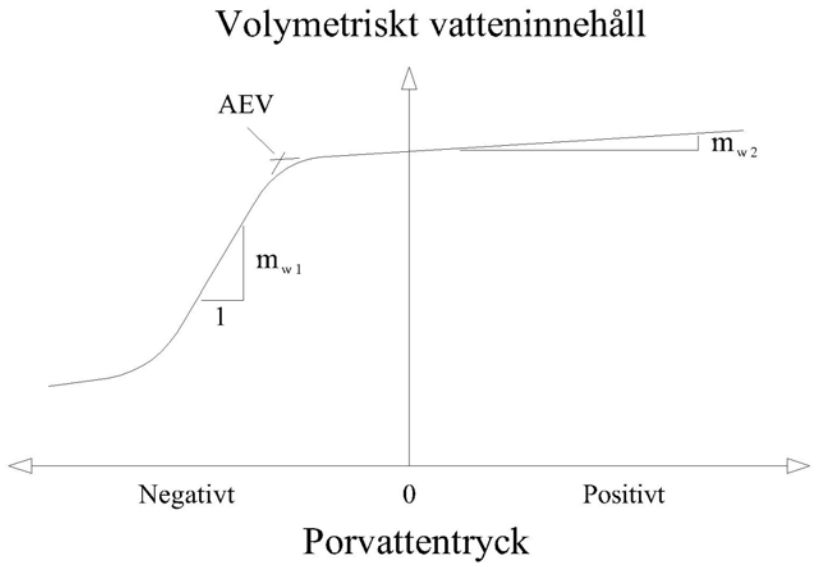
- Mättade och omättade flödesförhållanden
- Jämvikts och transient analys
- Tryckberoende konduktivitet och volymetriskt vatteninnehåll
- Anisotropisk hydraulisk konduktivitetskoefficient
- Transienta randvillkor

Där transient innebär att det sker förändringar över tiden. Ingångsparametrar i SEEP/W är hydraulisk konduktivitet och volymetriskt vatteninnehåll, som för lera är beroende av kompressionsmodulen och varierar med trycket. Volymetriskt vatteninnehåll definieras enligt

$$\theta = nS \tag{4.1}$$

Där θ = volymetriskt vatteninnehåll (Volumetric water content) [-]
n = porositeten [-]
S = vattenmättnadsgrad [-]

Det volymetriska vatteninnehållets förändring med trycket beskrivs av grafen i Figur 4.1. Denna kurva skiljer sig åt beroende på vilken jord den beskriver. För friktionsjord, som beskrivs i figuren, minskar vatteninnehållet kraftigt när det uppkommer gas i porerna vid AEV. Detta på grund av att de största porerna töms fortast. För en kohesionsjord är inte förändringen lika stor vid gasbildning utan det är mera jämnt utplanande, vilket beror på en lerjords mindre porer. Kurvan kallas lagringskapacitetskurva och lutningen på lagringskapacitetskurvan, m_w, beror av kompressionsmodulen genom $m_{w2} = 1/M$.



Figur 4.1 *Lagringskapacitetskurvan för en friktionsjord samt förhållande mellan m_w och porvattentryck*

Vid en transient analys har såväl uppställning av randvillkor samt valet av tidssteg stor betydelse.

4.1.1 Beräkningsmetod

I SEEP/W används Darcy's lag både för mättat och omättat flöde. Darcy's lag togs fram för mättat flöde men har bevisats gälla även för omättat flöde (Krahn 2004b). För omättat flöde är dock inte den hydrauliska konduktiviteten konstant utan varierar med vatteninnehållet och indirekt med porvattentrycket.

Darcy's lag:

$$q = ki \qquad (4.2)$$

där q = specifikt flöde [m/s]
k = hydraulisk konduktivitet [m/s]
i = hydraulisk gradient [m/m].

Den hydrauliska gradienten definieras

$$i = \frac{h}{l} \qquad (4.3)$$

där h = skillnad i tryckhöjd [m]
l = strömningsväg [m].

Den generellt styrande differentialekvationen för tvådimensionellt flöde i SEEP/W är:

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

där H = total tryckhöjd [mvp]
k_x = hydraulisk konduktivitet i x-riktning [m/s]
k_y = hydraulisk konduktivitet i y-riktning [m/s]
Q = definierat flödesvillkor [m^3/s]
θ = volymetriskt vatteninnehåll [%]
t = tid [s].

Ekvationen visar att skillnaden mellan det inströmmande och utströmmande flödet för en specifik tidpunkt är lika med förändringen i vatteninnehållet för elementet.

Vid stationära förhållanden är flödet in till och ut från ett element konstant i tiden, därmed kan högerledet i Ekvation 4.4 strykas och ekvationen kan reduceras till:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right)+Q=0 \qquad (4.5)$$

SEEP/W räknar med att totaltrycket är konstant, vilket innebär att programmet inte räknar med någon på- eller avlastning av jordens massa. I SEEP/W antas även att lufttrycket i porerna förblir konstant vid atmosfärstryck för transient analys. Vilket innebär att ändringen i volymetriskt vatteninnehåll kan relateras till porvattentrycket enligt följande ekvation:

$$\partial\theta = m_w \partial u_w \qquad (4.6)$$

där m_w = lutningen på lagringskapacitetskurvan, se Figur 4.1.

4.2 SLOPE/W

För att beräkna släntstabiliteten har datorprogrammet SLOPE/W använts. När den farligaste glidytan skall analyseras använder programmet två jämviktsekvationer, kraft- samt momentjämvikt, vilket kan resultera i glidytor med olika utseende. Eftersom SLOPE/W är ett program med många olika alternativ vad gäller beräkningsmetoder är det fördelaktigt att angripa ett problem utifrån följande fem aspekter (Krahn, 2004b):

- Geometri – beskrivning av slänten och utseende av potentiella glidytor
- Jordhållfasthet – parametrar som beskriver jordens materialegenskaper
- Porvattentryck – möjlighet att definiera porvattentrycket
- Förstärkningsåtgärder – till exempel användning av jordspikar, jordankare
- Pålagd yttre last

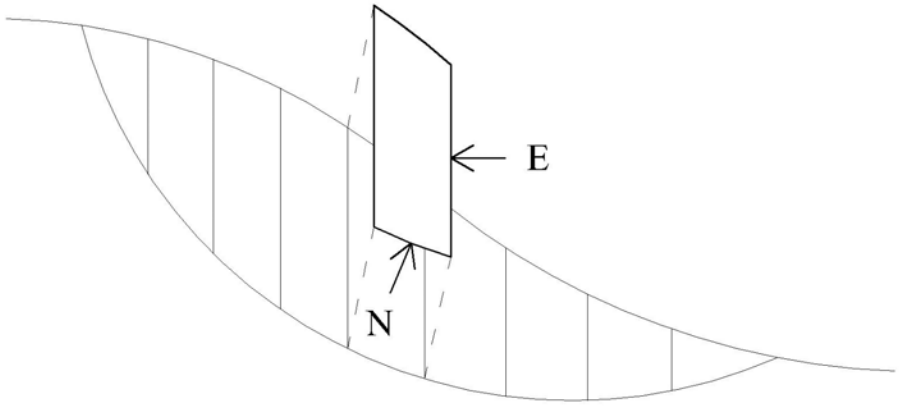
SLOPE/W beräknar odränerad och dränerad analys. Ingångsparametrar till SLOPE/W är egenvikten för materialet samt skjuvhållfastheten, som för dränerad analys beror av den inre friktionsvinkeln och effektiv kohesion.

4.2.1 Beräkningsmetod

SLOPE/W beräknar odränerad, dränerad eller kombinerad analys. Det vanligaste sättet att beskriva dränerad skjuvhållfasthet är genom Mohr-Coulombs ekvation, se Ekvation 3.2.

För den odränerade hållfastheten ansätter SLOPE/W den inre friktionsvinkeln till noll, vilket betyder att skjuvhållfastheten enbart beror av kohesionen. Detta innebär att förändrad effektivspänning, och därmed porvattentryck, inte har någon effekt på skjuvhållfastheten.

Som tidigare nämnts använder SLOPE/W två jämviktsekvationer för att beräkna säkerhetsfaktorn för den farligaste glidytan, kraftjämvikt samt momentjämvikt. För att göra dessa jämviktsberäkningar delar SLOPE/W in glidytan i ett antal lameller, se Figur 4.2, samt använder en generell begränsad jämvikt.



Figur 4.2 En slänt uppdelad i lameller för beräkning i SLOPE/W, med tillhörande normalkraft N samt horisontalkraften E.

Denna jämviktsekvation gör vissa förenklingar som t ex. att säkerhetsfaktorn är lika stor för lerhållfastheten som för friktionsjordens hållfasthet samt att säkerhetsfaktorn har samma värde för varje lamell (Krahn 2004b). Den generella begränsade jämviktsmetoden använder följande jämviktsekvationer för att beräkna säkerhetsfaktorn

- Summan av de vertikalkrafter som verkar på varje lamell används för att ange normalkraften vid botten av lamellen, N
- Summan av de horisontalkrafter som verkar mellan varje lamell används för att beräkna horisontalkraften, E
- Summering av moment kring en godtycklig punkt för alla lameller, vilket ger en säkerhetsfaktor för momentjämvikt, F_m
- Summering av horisontalkrafter för alla lameller, vilket ger en säkerhetsfaktor med avseende på kraftjämvikt, F_f

Eftersom det är viktigt att fastställa rätt porvattentryck i SLOPE/W för att en korrekt glidyta med tillhörande säkerhetsfaktor beräknas, finns det flera olika sätt att ange portrycket i datorprogrammet. Det finns även en möjlighet att importera portrycksprofiler från SEEP/W, där det är möjligt att använda portrycksprofilen som beräknats både med steady state-analys samt transient analys. Den transienta analysen gör det möjligt att för en viss tidpunkt använda dess tillhörande portrycksprofil som ingångsdata till SLOPE/W.

5 Modellering

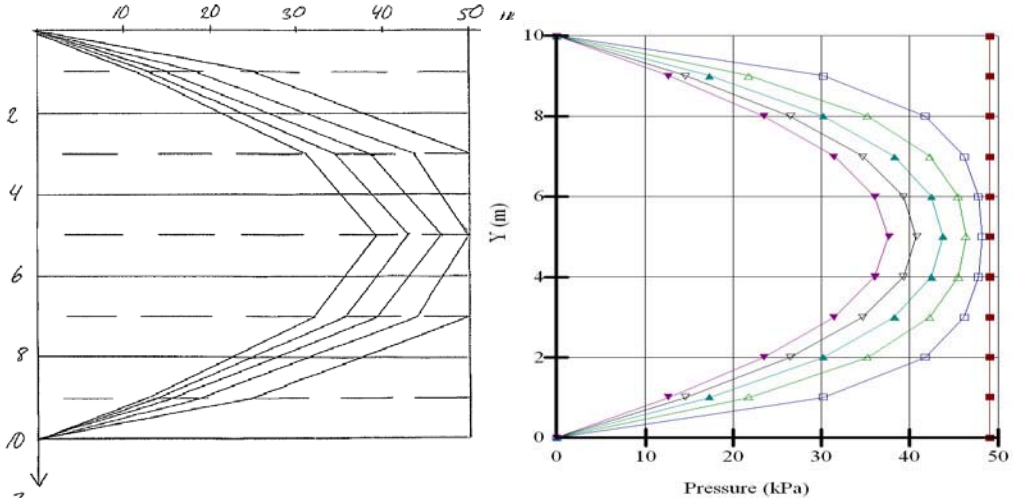
Numerisk modellering har potential för att göra kvantitativa förutsägningar, jämföra alternativ, identifiera känsliga parametrar samt öka förståelsen kring en problemframställning. För att erhålla bra modelleringsresultat krävs dock mer än ett avancerat datorprogram. Inställning att det bara är att mata in så mycket indata som möjligt i modelleringsprogrammet leder oftast till problem på grund av svårtolkade resultat. Modelleringen bör inledas med att skaffa sig en bild av resultatet, även om den inte är helt rätt leder tillvägagångssättet till en kritisk granskning av resultatet. Detta istället för att utifrån resultaten förklara vad som har hänt vilket kan leda till felaktiga slutsatser. Den inledande modellen bör vara enkel för att inte resultatet skall bli allt för komplicerat. Modellen kan sedan successivt utökas allteftersom meningsfulla resultat erhålls. För bra modellering krävs även en grundläggande förståelse för de beräkningsmetoder som programmet använder samt en god uppfattning om storleksordningen på ingående parametrar.

5.1 Verifiering av SEEP/W

Inledningsvis gjordes en jämförelse för utjämning av porövertryck mellan Helenelunds metod och SEEP/W. Därefter gjordes en känslighetsanalys för att klargöra hur varierande värden på parametrarna avspeglar sig på resultatet. Dessa analyser utfördes för en homogen lerprofil som var 30 meter bred och 10 meter hög med parametrar enligt Bilaga 1.

5.1.1 Jämförelse Helenelunds metod och SEEP/W

För att analysera hur väl Helenelunds metod och SEEP/W stämmer överens när det gäller beräkning av utjämning av porövertryck användes ovan beskrivna lerprofil. Trycket i profilen antas vara hydrostatiskt varpå en utbred last påförs som genererar ett övertryck i hela profilen på 50 kPa. För denna profil gjordes en handberäkning med Helenelunds metod, se Bilaga 2, samt en transient analys med SEEP/W. Tidsstegen ansattes vara lika för att resultaten skulle vara överskådliga och porövertrycksutjämningen jämfördes efter två år. Handberäkningen och beräkningen med SEEP/W visade sig stämma mycket bra överens, se Figur 5.1.



Figur 5.1 *Jämförelse mellan SEEP/W och Helenelunds metod för utjämning av porövertryck för en lerprofil efter två år.*

5.1.2 Känslighetsanalys

En känslighetsanalys genomfördes för att se om det är någon eller några parametrar i SEEP/W som har speciellt stor genomslagskraft. Den ovan beskrivna lerprofilen användes även för denna transienta analys. Startvärdet för analysen är ett övertryck på 50 kPa i hela lerprofilen. Därefter sattes randvillkoren till noll i botten och toppen av lerprofilen, för att simulera hur porövertrycket utjämnades över tiden. För att åskådliggöra olika parametrars betydelse har fyra transienta analyser gjorts där en parameter ändras i taget, se Tabell 5.1-5.4. Jämförelsen har gjorts för portrycksutjämning efter fyra steg, vilket motsvarar två år, där det aktuella portrycket på fem meter har använts för jämförelsen.

Tabell 5.1 Känslighetsanalys av konduktivitet

Konduktivitet [m/s]	Volymetriskt vatteninnehåll [%]	Modul [kPa]	Steg	**Portryck på 5 m [kPa]**
1*e-11	0.65	800	4	**49.4**
1*e-10	0.65	800	4	**48.0**
5*e-10	0.65	800	4	**43.5**
1*e-9	0.65	800	4	**34.1**
2*e-9	0.65	800	4	**20.8**
1*e-8	0.65	800	4	**1.4**
1*e-7	0.65	800	4	**8.2e-4**

Ändringen av konduktiviteten får ett stort genomslag vilket är ett rimligt resultat. Konduktiviteten bör definieras med omsorg eftersom den tillsammans med modulen är den huvudsakligen styrande parametern i SEEP/W.

Tabell 5.2 Känslighetsanalys av volymetriskt vatteninnehåll

Konduktivitet [m/s]	Volymetriskt vatteninnehåll [%]	Modul [kPa]	Steg	**Portryck på 5 m [kPa]**
1*e-9	0.95	800	4	**34.1**
1*e-9	0.75	800	4	**34.1**
1*e-9	0.65	800	4	**34.1**
1*e-9	0.55	800	4	**34.1**
1*e-9	0.35	800	4	**34.1**

Variationer i volymetriskt vatteninnehåll får inget utslag alls i SEEP/W. Detta eftersom programmet inte räknar med absolutvärdet utan enbart med förändringen i volymetriskt vatteninnehåll.

Tabell 5.3 Känslighetsanalys av modul

Konduktivitet [m/s]	Volymetriskt vatteninnehåll [%]	Modul [kPa]	Steg	**Portryck på 5 m [kPa]**
1*e-9	0.65	10000	4	**0.8**
1*e-9	0.65	5000	4	**4.1**
1*e-9	0.65	1000	4	**30.0**
1*e-9	0.65	800	4	**34.1**
1*e-9	0.65	600	4	**38.7**
1*e-9	0.65	400	4	**43.5**

Ändringen av modulen får stor genomslagskraft vilket beror på att den styr hur trycket fortplantas i en lerprofil. Vanligt förekommande är att utvärderade M_0-värden för modulen blir lägre vid CRS-försök än vad som ges för in situ-förhållanden varför de utvärderade värdena på M_0 bör ökas med en faktor tre till fem.

Tabell 5.4 Känslighetsanalys av tidssteg

Konduktivitet [m/s]	Volymetriskt vatteninnehåll [%]	Modul [kPa]	Steg	**Portryck på 5 m [kPa]**
1*e-9	0.65	800	1000	**33.1**
1*e-9	0.65	800	100	**33.2**
1*e-9	0.65	800	20	**33.4**
1*e-9	0.65	800	4	**34.1**
1*e-9	0.65	800	2	**34.7**

Antalet tidssteg har viss inverkan på resultatet men det viktigaste är att inte använda för stora tidssteg vid användning av transienta randvillkor.

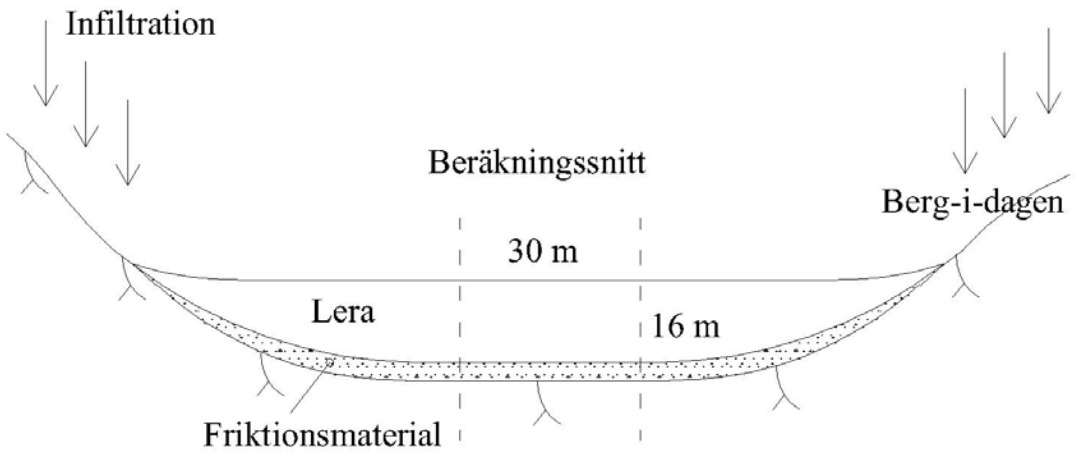
6 Fallstudier

Två fallstudier har utförts i områdena Korpemyren samt Yxan. Korpemyren är belägen i södra Ljungskile och Yxan ligger centralt i Uddevalla utmed Bäveån. Båda områdena har en jordprofil som består av ett homogent lerskikt som överlagrar ett skikt med friktionsmaterial. Korpemyren är ett platt område medan Yxan består av en slänt ner mot Bäveån. Områdena har valts för att de respektive jordprofilerna lämpar sig väl för att undersöka hur tryckvariationerna i det underlagrande friktionsmaterialet tillsammans med infiltrationen påverkar portrycken i lerprofilen. För dessa finns även gjorda portrycksmätningar. Korpemyren behandlades inledningsvis för att få en ökad förståelse för hur datorprogrammet SEEP/W beräknar portrycken under sådana förhållanden. För Yxan analyserades portrycken på ett likvärdigt sätt som för Korpemyren varefter portrycken användes för att undersöka hur de påverkar släntstabiliteten samt att se hur olika sätt att definiera portrycken i SLOPE/W påverkar stabilitetsresultatet.

6.1 Korpemyren

Målet för Korpemyren har varit att med hjälp av datorprogrammet SEEP/W simulera portryck som stämmer överens med uppmätta värden för hela lerprofilen. Detta har gjorts genom att använda de uppmätta vattentrycken i friktionsmaterialet tillsammans med nederbördsrelaterad infiltration som ingångsdata. För att optimera överensstämmelsen mellan de uppmätta och simulerade portrycken justerades de utvärderade värdena på den hydrauliska konduktiviteten, kompressionsmodulen samt infiltrationsmängden.

Korpemyren är ett bostadsområde som är beläget på ett relativt platt område som omsluts av höjder med berg-i-dagen. Den platta delen av området består av en homogen lerprofil som avsatts på ett lager av friktionsmaterial vilken i sin tur ligger på berg, se Figur 6.1.



Figur 6.1 Tvärsektion av Korpemyren med beräkningssnittet markerat

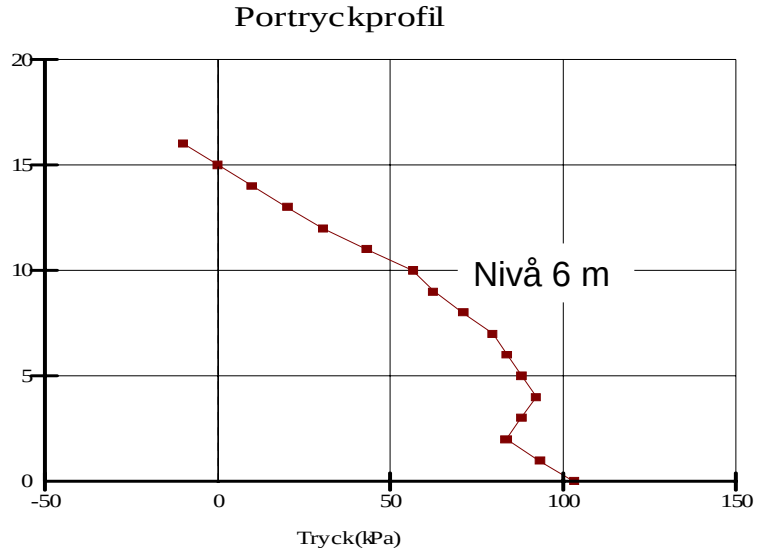
Ytorna med berg-i-dagen runtom området skapar ytavrinning som infiltreras ner i jordprofilen genom skiktet med friktionsmaterial. Eftersom berget återfinns under hela profilen skapas ett övertryck till följd av att den infiltrerade nederbörden stannar inom området.

Efter att en bergvärmeborrning genomfördes 1991, uppstod kraftiga sättningar i området. Vid påföljande undersökningar av område framgick det att grundvattenytan hade sänkts av med 10 meter, vilket orsakade sättningarna. Den kraftiga avsänkningen berodde troligen på att det borrades genom en sprickzon när borrningen för bergvärme genomfördes, vilket snabbt dränerade området. För att hindra sättningsförloppet tätades borrhålen 1995 och konstgjord infiltration påbörjades. Åtgärderna gjorde att trycken i profilen i stort sett återgick till de ursprungliga nivåerna. När den konstgjorda infiltrationen avslutades sjönk trycket igen. Trycksituationen stabiliserades dock efter några år, när trycket i det underlagrande friktionsmaterialet var cirka 50 kPa lägre än den ursprungliga nivån från 1991. Årstidsfluktuationerna för den nya situationen gav även en större tryckvariation i det underlagrande friktionsmaterialet än innan borrningen för bergvärme utfördes, se Bilaga 3.

6.1.1 Arbetsgång

För att undersöka hur väl SEEP/W simulerar portryck jämfördes värden från transienta analyser med uppmätta portryck. Inledningsvis gjordes analyser med utvärderade värden på ingångsparametrarna. För att få en bättre överensstämmelse mellan de simulerade och uppmätta värden gjordes även analyser där ingångsparametrarna modifierades. Avslutningsvis beaktades ett siltskikt i lerprofilen som inledningsvis förbisetts.

Undersökningarna av markförhållandena är från 2003, vilket är tidpunkten då analysen av årstidsfluktuationers påverkan på portrycket påbörjades. Parametrarna grundas främst på CRS-försök. Vid starten för analysen har portrycksprofilen ett komplicerat utseende till följd av tidigare variationer i det underlagrande friktionsmaterialet, se Figur 6.2.



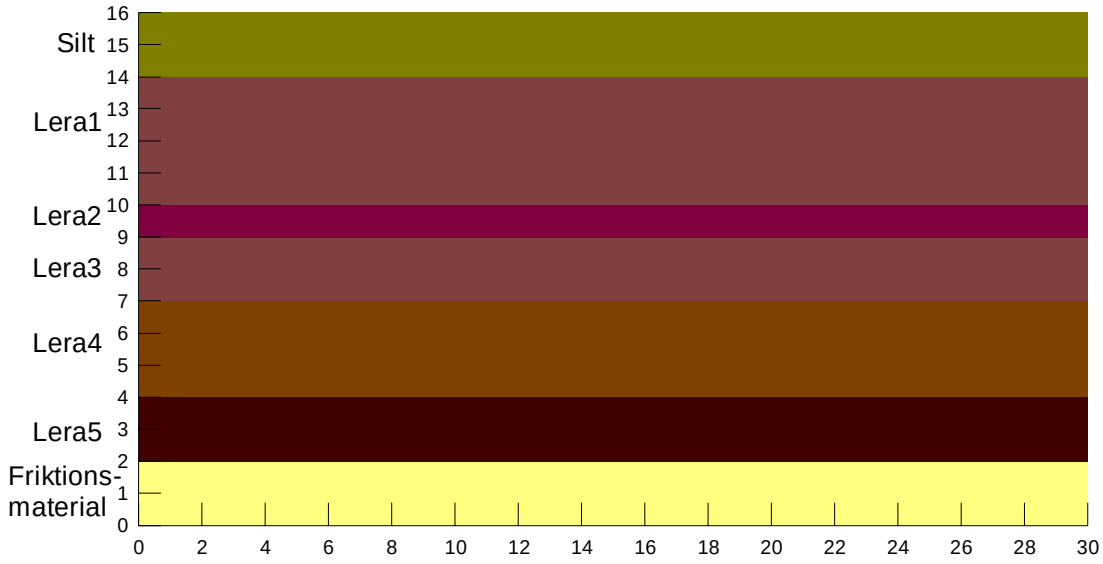
Figur 6.2 Portrycksprofil vid start av transient analys

De portryck som användes som startvärde för den transienta analysen skapades med en jämviktsanalys från SEEP/W, där portrycken angivits så att portrycksprofilen fick samma utseende som för de uppmätta värdena för starttidpunkten.

För att kunna analysera hur portrycksprofilen i leran ändras har resultaten jämförts med värden från portrycksmätare på fyra olika nivåer i lerprofilen; på 4, 6, 10 och 12 meters djup. Vidare är en portrycksmätare placerad i friktionsmaterialet på 15 meters djup. Det uppmätta vattentrycket vid 15 meters djup används som randvillkor i SEEP/W. Dessa mätare har avlästs med ungefär två veckors mellanrum under drygt tre år. De portryck som SEEP/W genererar har jämförts med de uppmätta portrycken för varje nivå. Vidare har nederbörden registrerats lokalt under drygt tre månader. Nederbördsdatan har jämförts med nederbördsdata från SMHI:s närmaste mätstation i Uddevalla för att undersöka om den längre mätserien från Uddevalla är representativ för området. Nederbördsdatan har använts för att definiera infiltrationen men även för att finna ett samband mellan nederbördsmängden och tryckförändringarna i friktionsmaterialet. Analysen av årstidsfluktuationerna är gjord mellan augusti 2003 och september 2006.

Analysen av Korpemyren inleddes med en förenklad modell med ett skikt för att inte resultaten skulle bli för svårtolkade. Området som studerades var 30 meter brett och 16 meter djupt där omfattande undersökningar har gjorts, se Figur 6.1. Inledningsvis användes utvärderade värden från CRS-försök på den hydrauliska konduktiviteten och kompressionsmodulen där samma värden användes för hela profilen. Konduktiviteten, k, var 1e-9 m/s och modulen, M, 4000 kPa. Infiltrationen ansattes till noll. Randvillkoren som används i SEEP/W är tryckförändringarna i friktionsmaterialet.

Analysen fortsattes med att dela in lerprofilen i fem skikt med avseende på lerans egenskaper, se Figur 6.3.



6.3 Tvärsektion av Korpemyren med indelad lerprofil

Därefter gjordes en simulering med värden på modulen och konduktiviteten som utvärderade för de olika lerlagren, se Tabell 6.1. Infiltrationen var konstant på 1e-9 m/s. Infiltrationen grundas på nederbördsdata från området, där hänsyn tagits till att större delen av nederbörden inte infiltreras, se stycke 3.1.2.

Tabell 6.1 Utvärderade parametervärden från CRS-försök för Korpemyren

Jordprofil	*k* [m/s]	M_0 [kPa]	M_L [kPa]
Silt	1.0E-06		
Lera1	2.0E-09	3000	300
Lera2	2.0E-09	3500	1200
Lera3	7.0E-09	4500	700
Lera4	1.5E-09	3500	1200
Lera5	8.0E-10	5500	1400
Friktionsmaterial	5.0E-06		

Eftersom analysen med de utvärderade parametrarna inte var helt tillfredsställande blev nästa steg att undersöka om modifierade värden på parametrar ger en bättre överensstämmelse mellan den simulerade och uppmätta profilen. De ändrade parametrarna relaterades till de utvärderade, vilket gjordes för att det skulle vara överskådligt hur de ändrats i påföljande analysering.

Även infiltrationen ändrades från att vara konstant till att vara en transient regnserie. Försök gjordes där olika stor andel av nederbörden infiltrerades där trenden för de övre trycknivåerna användes som riktlinjer. Vidare ökades modulen för att öka genomslaget i profilen, genom att fluktuationerna blir större. Att modulen ökas kan förklaras med att värdena är utvärderade från CRS-försök i vilka modulen blir lägre än för utvärderade värden från in situ-förhållanden, se stycke 3.2.2.

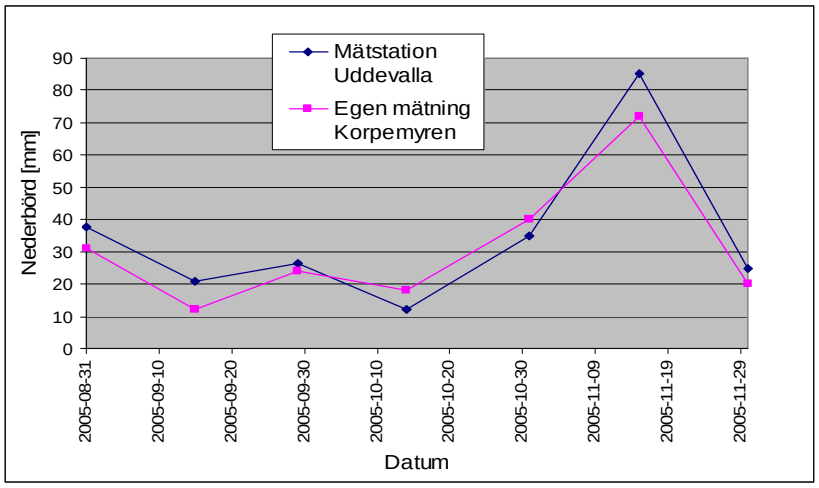
I de inledande analyserna förbisågs ett tunt siltskikt som ligger på nivå 6,5 meter, varför också försök gjordes för att se hur profilen såg ut om detta skikt var vattenförande likt det underlagrande friktionsmaterialet. För att analysera dessa förhållanden användes fluktuationerna på 6,5 meters nivå som randvillkor tillsammans med nederbörd och tryckförändringar i friktionsmaterialet. Modulen var vid simuleringen fem gånger högre än utvärderat och konduktiviteten var som utvärderad, samt att ingen infiltration ansattes.

6.1.2 Resultat

När analyserna gjordes med en homogen lerprofil gick det inte att få en acceptabel överensstämmelse mellan de uppmätta och simulerade portrycken, även om parametrarna modifierades. När däremot siltskiktet i lerprofilen beaktades samt ansattes vara vattenförande blev överensstämmelsen god.

Vid undersökning av spänningstillståndet för området har det konstaterats att hela lerprofilen är överkonsoliderad, se Bilaga 4, vilket medför att M_0 blir den styrande parametern tillsammans med konduktiviteten för mättat tillstånd. I SEEP/W kan bara en modul definieras. Det är inte möjligt att ändra lutningen på den kurva som definierar modulen vid brytpunkten mellan M_0 och M_L, varför det är viktigt att undersöka vilket spänningstillstånd som gäller.

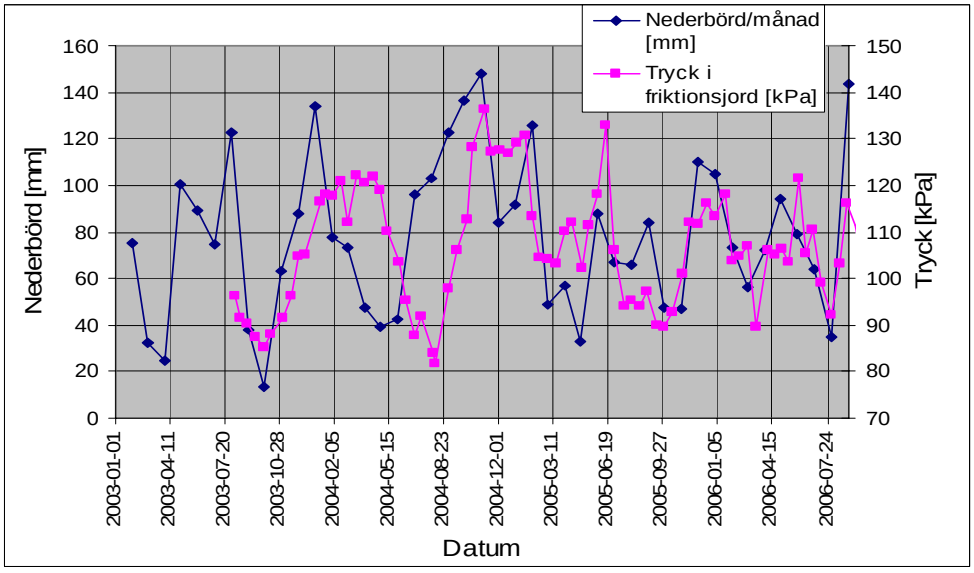
Vid jämförelsen av den lokala nederbörden för området och SMHI:s närmaste mätstation i Uddevalla visade sig överensstämmelsen vara bra, se Figur 6.4.



Figur 6.4 Jämförelse mellan nederbörden lokalt för Korpemyren och för närmaste regnstation, Uddevalla

Nederbördsdata från Uddevalla användes för att finna ett samband mellan nederbörd och portrycksförändring i friktionsmaterialet samt att bestämma infiltrationen. Nederbördsdatan används både till att generera en konstant infiltration och en transient infiltrationsserie. Vid bestämningen av den konstanta infiltrationen fördelas årsnederbörden över alla dagar och sedan infiltreras en procentsats av den varje dag. Vid den transienta infiltrationen infiltreras istället en viss del av varje dags nederbörd. Hur stor del som infiltrerades har för bägge fallen modellerats fram genom att trycknivåerna och trenderna på de övre nivåerna i jordprofilen har jämförts med de uppmätta värdena.

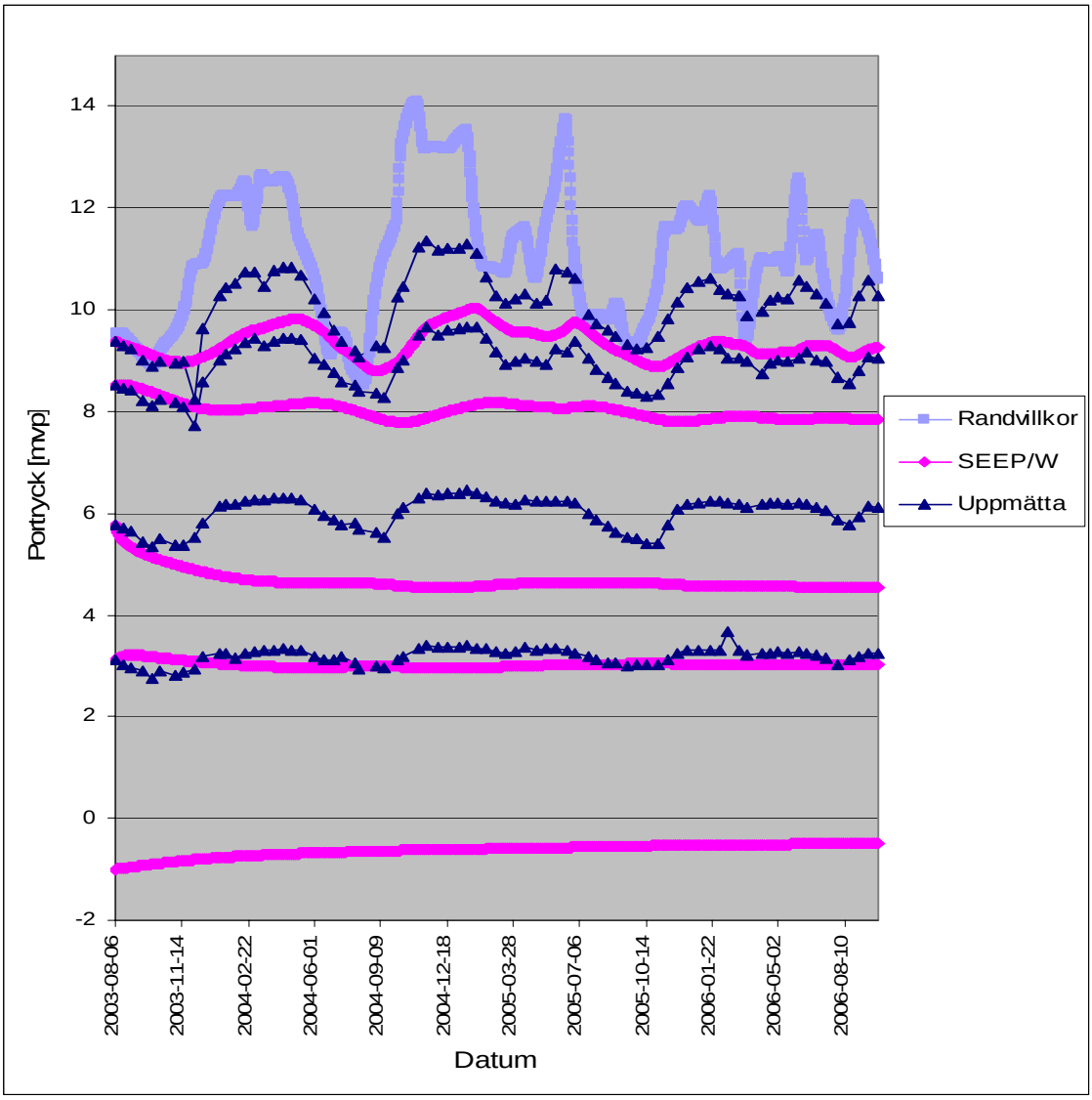
Trycket i det underlagrande friktionsmaterialet följer nederbördens utseende väl med en viss fördröjning, se Figur 6.5. Detta tyder på att det finns en snabb infiltrationsväg till friktionsmaterialet genom att skiktet vid utsträckningen i sidled är nära ytan samt står i kontakt med berg-i-dagen.



Figur 6.5 Nederbördens påverkan på vattentrycket i friktionsmaterialet

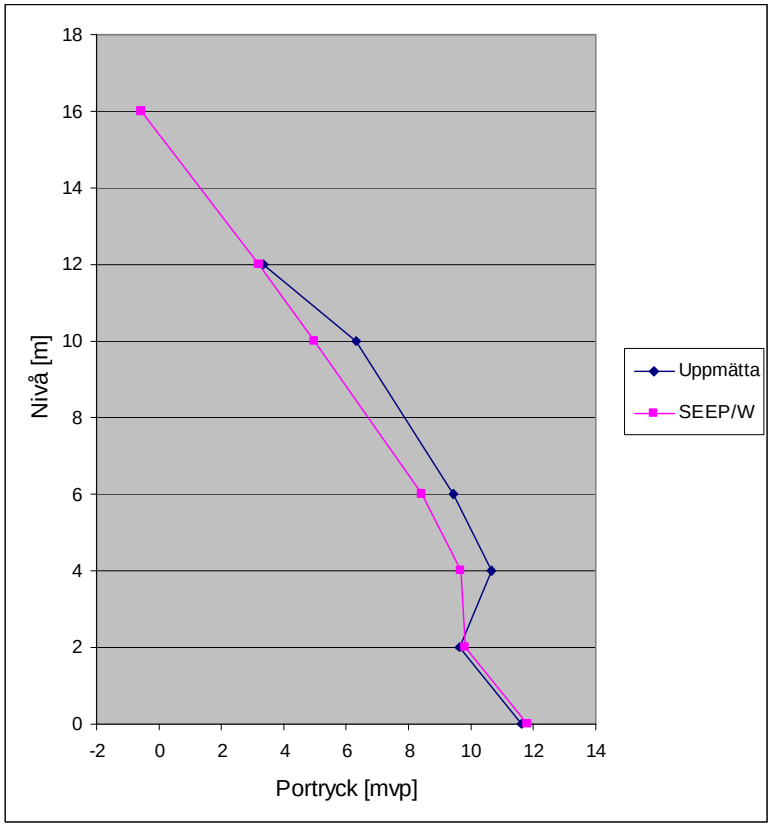
Vid jämförelse mellan de simulerade och uppmätta portrycken gav analysen med en homogen profil ett relativt bra resultat med avseende på trenden, medan däremot tryckvariationerna uteblev. Portrycken var även genom hela profilen lite låga. I modellen har förloppet gått för snabbt där portrycken i mitten på profilen har sjunkigt mer för de simulerade värdena än för de uppmätta värdena. Anledningen till detta var en lägre konduktivitet i botten på den verkliga profilen, vilket sänker tryckspridningshastigheten uppåt i profilen.

Vidare delades lerprofilen in i skikt för att bättre stämma överens med de utvärderade parametrarnas variation med djupet. Även vid denna simulering blev trycken i profilen genomgående lägre samt att variationerna var mindre än för de uppmätta värdena, se Figur 6.6.



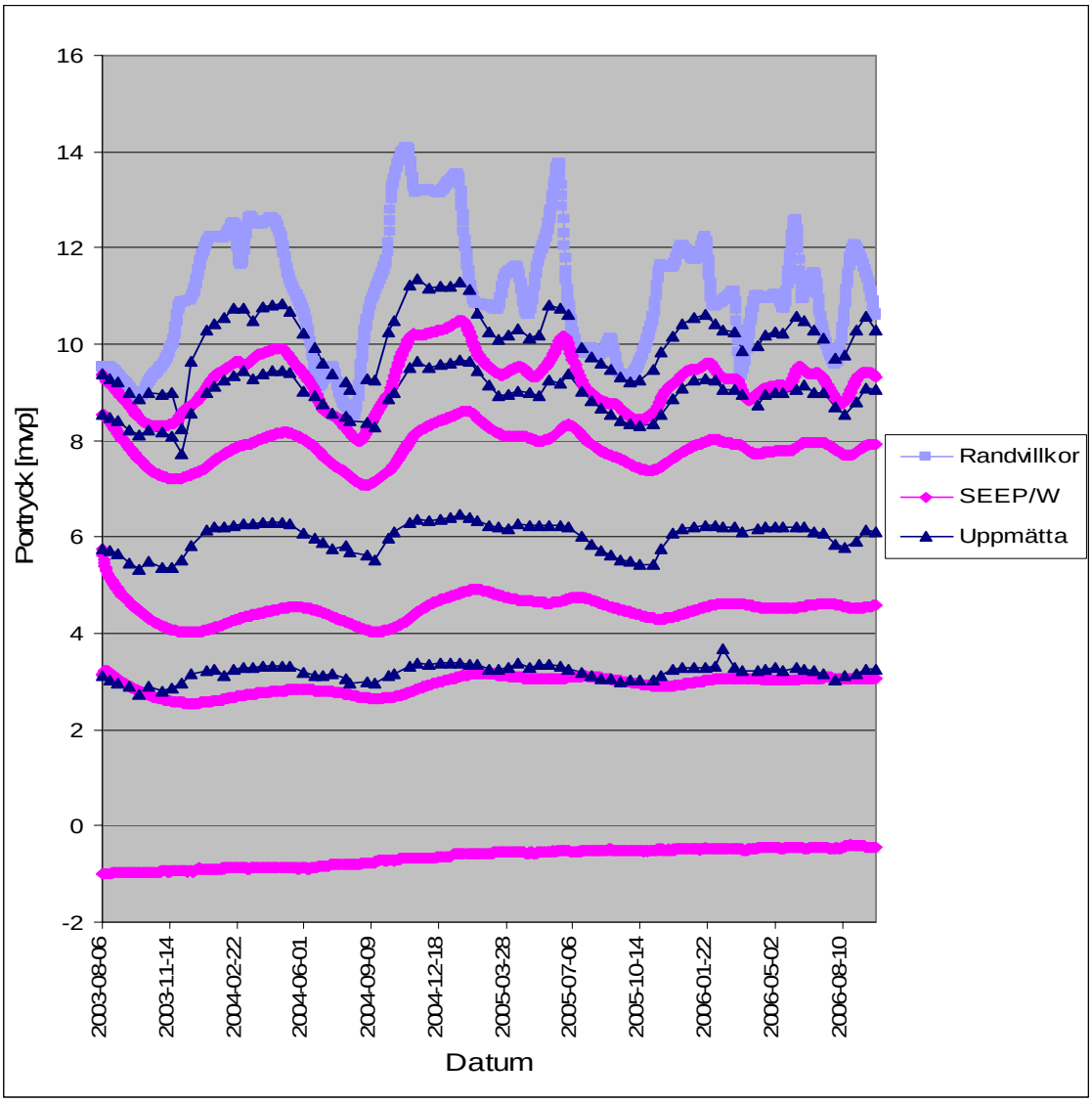
Figur 6.6 *Jämförelse mellan simulerade och uppmätta portryck för de olika nivåerna i leran. Modulen och konduktiviteten som utvärderat. Infiltrationen var konstant, 1e-9 m/s. Notera att nivåerna är omvända, dvs. det högsta portrycket i grafen är beläget lägst ned i jordprofilen.*

Simuleringen var inte helt tillfredsställande. Trycket i mitten och de lägre nivåerna av profilen sjunker mer än för de uppmätta värden och fluktuationerna är betydlig mindre för de simulerade värden. När tryckprofilen för de simulerade och uppmätta värdena plottas i samma diagram syns det att trycket hålls uppe i mitten av profilen för de uppmätta värdena medan de simulerade sjunker mot det tryck som råder i friktionsmaterialet, se Figur 6.7.



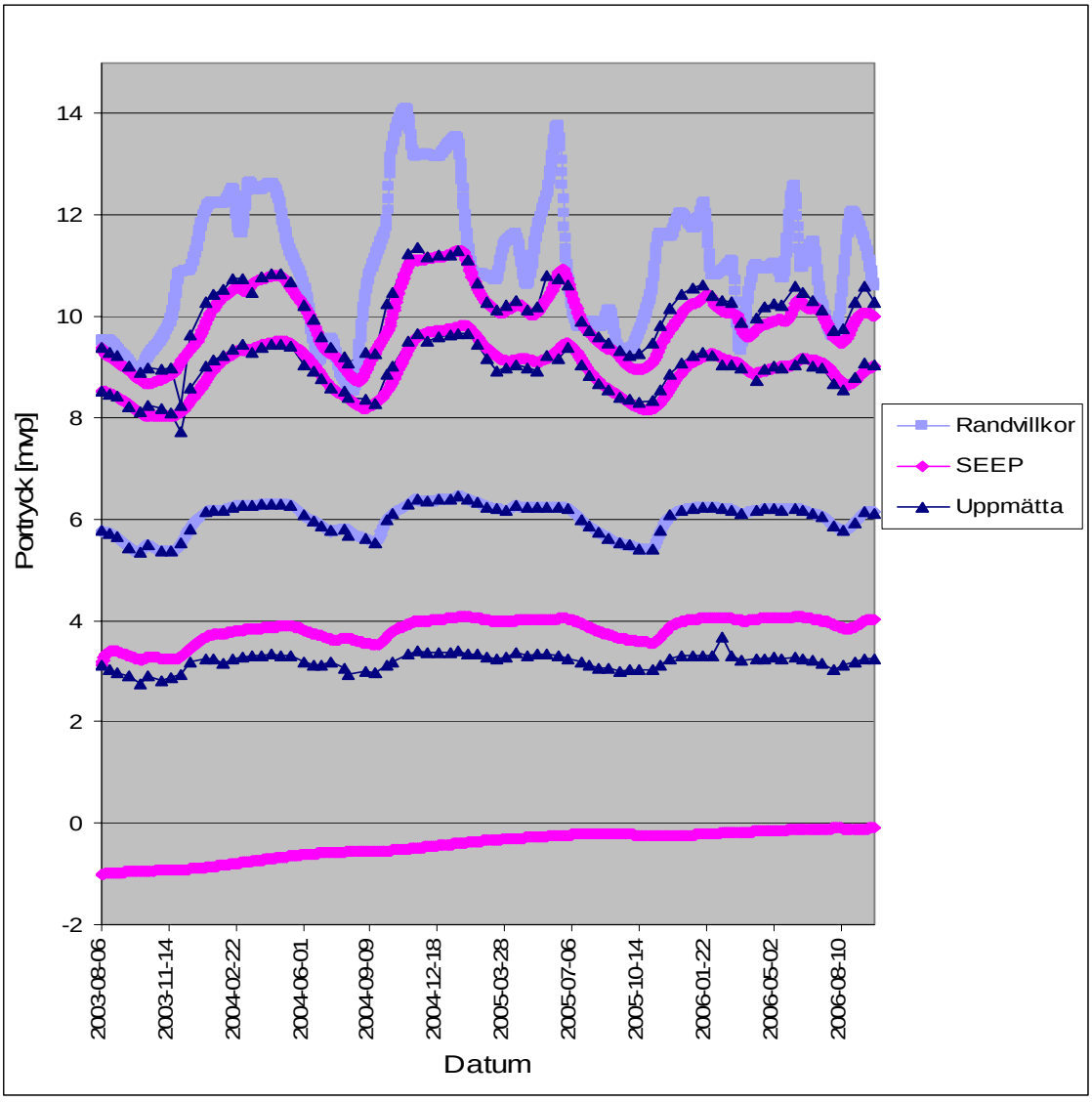
Figur 6.7 *Jämförelse av portrycksprofil för uppmätta och med SEEP/W beräknade värden. Som graferna visar är trycket i verkligheten högre än vad SEEP/W använder i beräkningarna.*

Vid de fortsatta analyserna blir det ingen fullständig överensstämmelse trots att parametrarna modifieras samt att infiltrationen ändrades från att vara konstant till en transient regnserie. De parametrar som ger bäst resultat är med en ökning av modulen med en faktor fem samt att konduktiviteten är som utvärderad. Infiltrationen varierar och är 2 procent av nederbörden vilket motsvarar ett flöde på igenomsnitt 5e-10 m/s om den fördelas jämt över året. Vid simuleringarna används 2 procent av nederbörden varje dag varför flödet är större vissa dagar och noll andra dagar. Fluktuationerna blir bättre men det är genomgående ett lägre tryck i mitten på profilen, på samma sätt som för fallet ovan enligt Figur 6.7. Det är främst trycket på nivå 6 meter som är betydligt lägre vid simuleringen, se Figur 6.8.



Figur 6.8 *Jämförelse mellan simulerade och uppmätta portryck för de olika nivåerna i leran. Modulen är ökad med en faktor fem och konduktiviteten är som utvärderad. Infiltrationen varierar och är 2 procent av nederbörden. Notera att nivåerna är omvända, dvs. det högsta portrycket i grafen är beläget lägst i jordprofilen.*

Vid påföljande analys ansattes att ett tunt siltskikt på djup 6 meter var vattenförande, detta skikt har tidigare förbisetts. För att simulera skiktet som vattenförande angavs de uppmätta portrycken för denna nivå som randvillkor. Överensstämmelsen blev mycket bra för alla nivåerna utom den närmast markytan (på 4 meters djup), se Figur 6.9. För denna nivå ökar portrycket över tiden i jämförelse med de uppmätta vilket tyder på att denna situation inte fullständigt speglar verkligheten. Detta på grund av att trycket ökar trots att det inte är ansatt någon infiltration. Det verkliga fallet uppstår sannolikt genom att siltskiktet orsakar huvuddelen av tryckhöjningen på nivå 6 meter och sedan bidrar infiltrationen med en mindre andel till tryckhöjningen. Detta förhållande går dock inte att simulera i SEEP/W för när trycken anges för en nivå kan det inte tillkomma några ökningar till de angivna trycken. Resultatet visar på att skiktet sannolikt är vattenförande, vilket tryckprofilen vid analysens start antyder med en tryckökning på nivå 6 meter, se Figur 6.2.

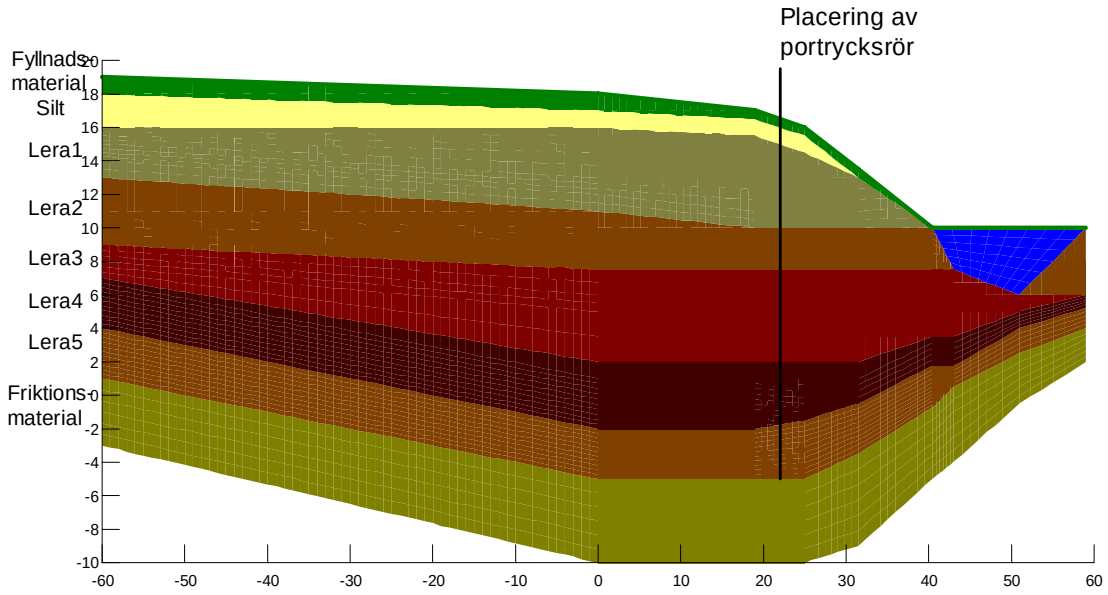


Figur 6.9 *Jämförelse mellan simulerade och uppmätta portryck för de olika nivåerna i leran. Modulen är ökad med en faktor fem och konduktiviteten är som utvärderad samt ingen infiltration. Notera att nivåerna är omvända, dvs. det högsta portrycket i grafen är beläget lägst i jordprofilen, samt att nivån på 6 meter är randvillkor.*

6.2 Yxan

Målet för Yxan har varit att med hjälp av SEEP/W simulera fram de portryck som stämmer överens över tiden med de uppmätta portrycken. Även för detta område har det gjorts genom att använda vattentrycksförändringar i friktionsmaterialet som randvillkor tillsammans med infiltrationen, för att beräkna hur portrycket fortplantas i lerprofilen. De ingående jordparametrarna i SEEP/W, hydrauliska konduktivitet och kompressionsmodul, modifierades för att optimera överensstämmelsen mellan de uppmätta och simulerade portrycken. Även infiltrationsmängden modifierades vid analyserna. Det är även av stort intresse att klargöra hur portrycksförändringarna påverkar släntstabiliteten, samt om sättet att definiera portrycken har betydelse varvid stabilitetetsanalyser har gjorts med datorprogrammet SLOPE/W.

Bostadsområdet Yxan är beläget i centrala Uddevalla där stora delar av området lutar mot Bäveån, som slingrar sig genom området. Jordprofilen består huvudsakligen av lera som överlagrar friktionsmaterial vilket ligger på berget. På ena sidan är av detta område är det berg-i-dagen vilket gör att det skapas ytavrinning som infiltreras ned i friktionsmaterialet det är trots detta ett visst undertryck i botten. Slänten som undersökts är 55 meter lång med en höjdskillnad på 12 meter. Överst består slänten av 1 m fyllnadsmaterial följt av ett siltlager på 2 meter. Under det tar en homogen lera vid ned till det underlagrande friktionsmaterialet, se Figur 6.10. Lerans egenskaper varierar och variationerna är horisontella, slänten har uppkommit tillföljd av åns erosion.



Figur 6.10 Portrycksmätarnas placering samt profil av slänten Yxan

6.2.1 Arbetsgång SEEP/W

Liksom för Korpemyren har det gjorts transienta analyser med SEEP/W för att undersöka hur de simulerade portrycken stämmer överens med de uppmätta. På samma sätt som för Korpemyren har portrycksförändringar i det underlagrande

friktionsmaterialet tillsammans med infiltration använts som ingångsdata för att undersöka hur portrycken i leran påverkas.

För att kunna analysera hur portrycken varierar över tiden har simulerade portryck jämförts med värden från fyra portrycksmätare placerade i den övre delen av slänten se Figur 6.10. Dessa var placerade på tre olika nivåer i lerprofilen; 11,5, 5 och -1,5 meter, samt en i det underlagrande friktionsmaterialet. Det första året gjordes sporadiska mätningar och 2002 påbörjades kontinuerliga portrycksmätningar med ett intervall på ungefär 2 veckor.

Förändringarna i portrycken beror på nederbörden för området dels på grund av den relativ lilla del som infiltreras från ytan och dels från den större delen som infiltreras direkt till det underlagrande friktionsmaterialet. För att bestämma nederbördens storlek och variation har nederbördsdata för Uddevalla kommun använts. Denna regnmätare finns vid vattenverket Marieberg som är beläget ca 1,5 km från området Yxan. Vidare har nederbördsdata jämförts med tryckförändringarna i friktionsmaterialet över tiden för att undersöka eventuella samband.

För den första analys som gjordes var lerprofilen indelad i skikt med tillhörande konduktivitet och kompressionsmodul, se Tabell 6.2. Dessa parametrar har utvärderats från CRS-försök, som dock var gjorda ca 150 meter från den aktuella slänten där djupet skiljer gentemot den undersökta slänten. För denna analys var infiltrationen konstant, 2e-9 m/s.

Tabell 6.2 Utvärderade jordparametrar från CRS-försök för Yxan

Jordprofil	k [m/s]	M_0 [kPa]	M_L [kPa]
Fyllnadsmaterial	5.0E-07		
Silt	1.0E-06		
Lera1	1.7E-09	3500	500
Lera2	1.2E-09	4700	400
Lera3	1.2E-09	6100	800
Lera4	8.0E-10	7900	600
Lera5	7.0E-10	9300	1300
Friktionsmaterial	5.0E-06		

När de simulerade portrycken inte överensstämde med de uppmätta gjordes ytterligare simuleringar där hydraulisk konduktivitet samt kompressionsmodulen ändrades. Även infiltrationen ändrades från att vara konstant till att vara en transient regnserie. Andel av nederbörd som infiltreras är belagda med en mängd osäkerheter, se stycke 3.1.2. Detta gjorde att andelen infiltrerad nederbörd modellerades fram, vilket gjordes genom att jämföra trenden och fluktuationerna för de övre nivåerna med de simulerade och uppmätta portrycken.

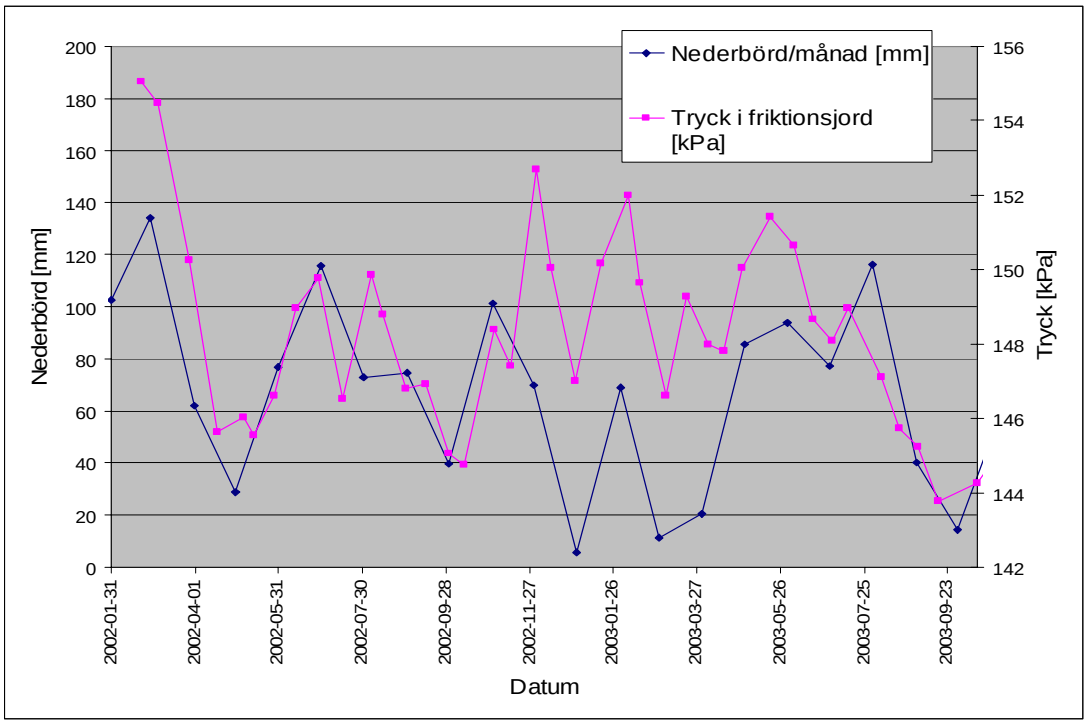
När de inledande analyserna inte medförde att acceptabel överensstämmelse uppnåddes, varierades de ingående parametrarna fritt för att försöka finna en portrycksprofil som över tiden stämmer överens med de uppmätta.

6.2.2 Resultat SEEP/W

Vid simulering för Yxan nåddes inte en fullständig överensstämmelse med de uppmätta värdena. Detta beror på att analyserna är belagda med en mängd osäkerheter, så som att CRS-försöken var gjorda långt från platsen vilket medförde osäkerhet på jordprofilens utseende, samt att lutningen på slänten gjorde flödesförhållandena mer komplicerade. Bäst resultat gav analysen när modulen ökades med en faktor 10, konduktiviteten som utvärderad samt infiltrationen var 10 procent av nederbörden.

Vid undersökningar av spänningsförhållandet i marken konstaterades det att hela jordprofilen var överkonsoliderad, se Bilaga 5. Detta medför att de styrande parametrarna är M_0 för hela lerprofilen tillsammans med den hydrauliska konduktiviteten för mättat tillstånd.

Vid jämförelse av uppmätta regnmängder från området med trycket i det underlagrande friktionsmaterialet erhålls ett samband där nederbörds- och tryckkurvorna följs åt, se Figur 6.11. De avvikelser som finns beror på att det är en viss förskjutning från att det regnar tills det når friktionsmaterialet men även att mätningarna inte är gjorda för exakt samma tidpunkt.

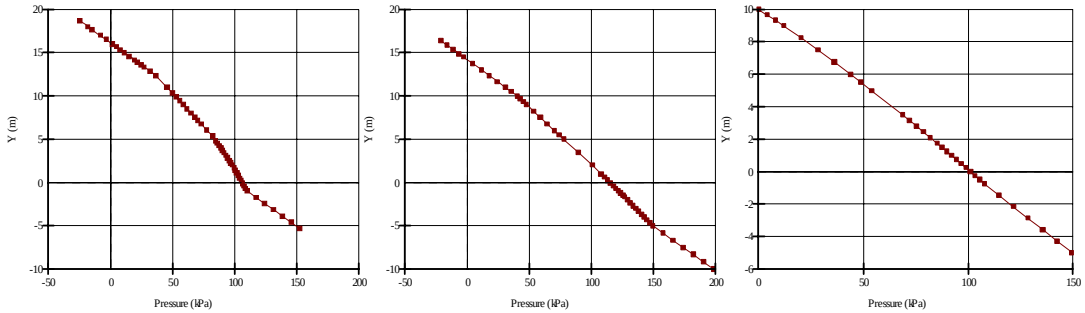


Figur 6.11 Jämförelse mellan nederbördsvariation och tryck i underlagrande friktionsmaterial

Att trycket i det underlagrande friktionsmaterialet ändras så snabbt med nederbörden tyder på att det finns en snabb infiltrationsväg, vilket kan förklaras med att skiktet i utsträckningen går upp till ytan samt står i förbindelse med berg-i-dagen.

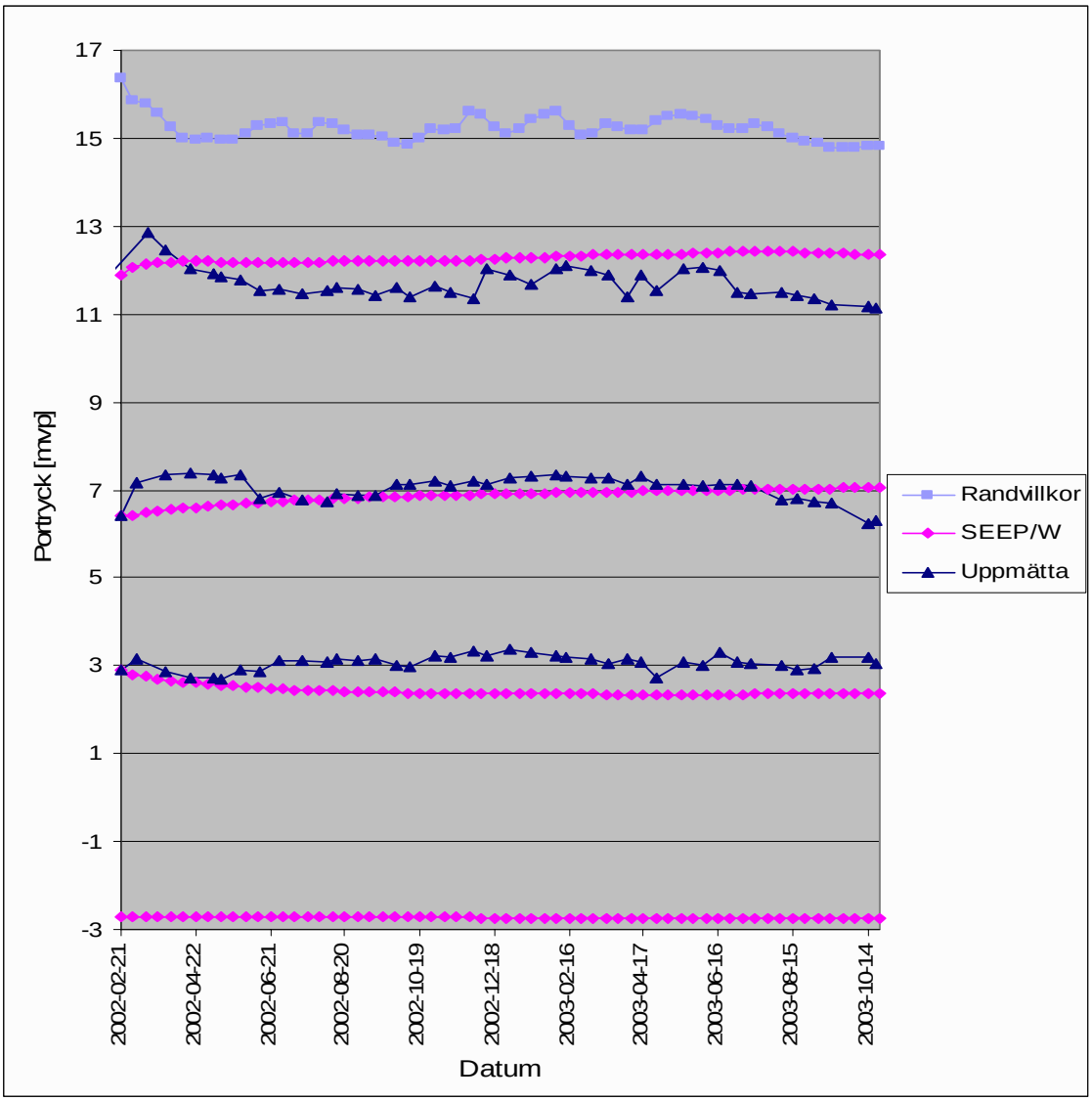
Beräkningar av infiltrationen är belagda med en rad osäkerheter. Detta gjorde att andelen infiltrerad nederbörd modellerades fram genom att trenden tillsammans med trycknivån i den övre delen av profilen jämfördes med de uppmätta värdena på samma nivå. Detta gav en infiltration på 10 procent av nederbörden, när utvärderade värden på konduktiviteten och modulen användes.

Vid modelleringen i SEEP/W jämförs resultaten med uppmätta värden från området. Vad som då måste beaktas är att det inte går att få en fullständigt överensstämmande modellerad profil eftersom det inte finns något helt tydligt samband mellan de uppmätta värdena på olika nivåer. Trenderna stämmer relativt bra överens på olika nivåer men det går inte att urskilja hur en ökning i friktionsmaterialet sprids uppåt i profilen. Detta kan förklaras med att det ständigt sker tryckändringar både uppifrån och nedifrån och den hydrauliska gradienten därför är riktad åt olika håll i olika delar av profilen samt varierar i tiden. Det som gör att förhållandena är svåra att simulera är att det dessutom sker förändringar i horisontalled, eftersom portrycksmätningarna är utförda i slänten. För slänten varierar också portrycksprofilens utseende i sidled med ett nära hydrostatiskt förhållande vid ån och en mer och mer varierande profil bort från ån, se Figur 6.12.



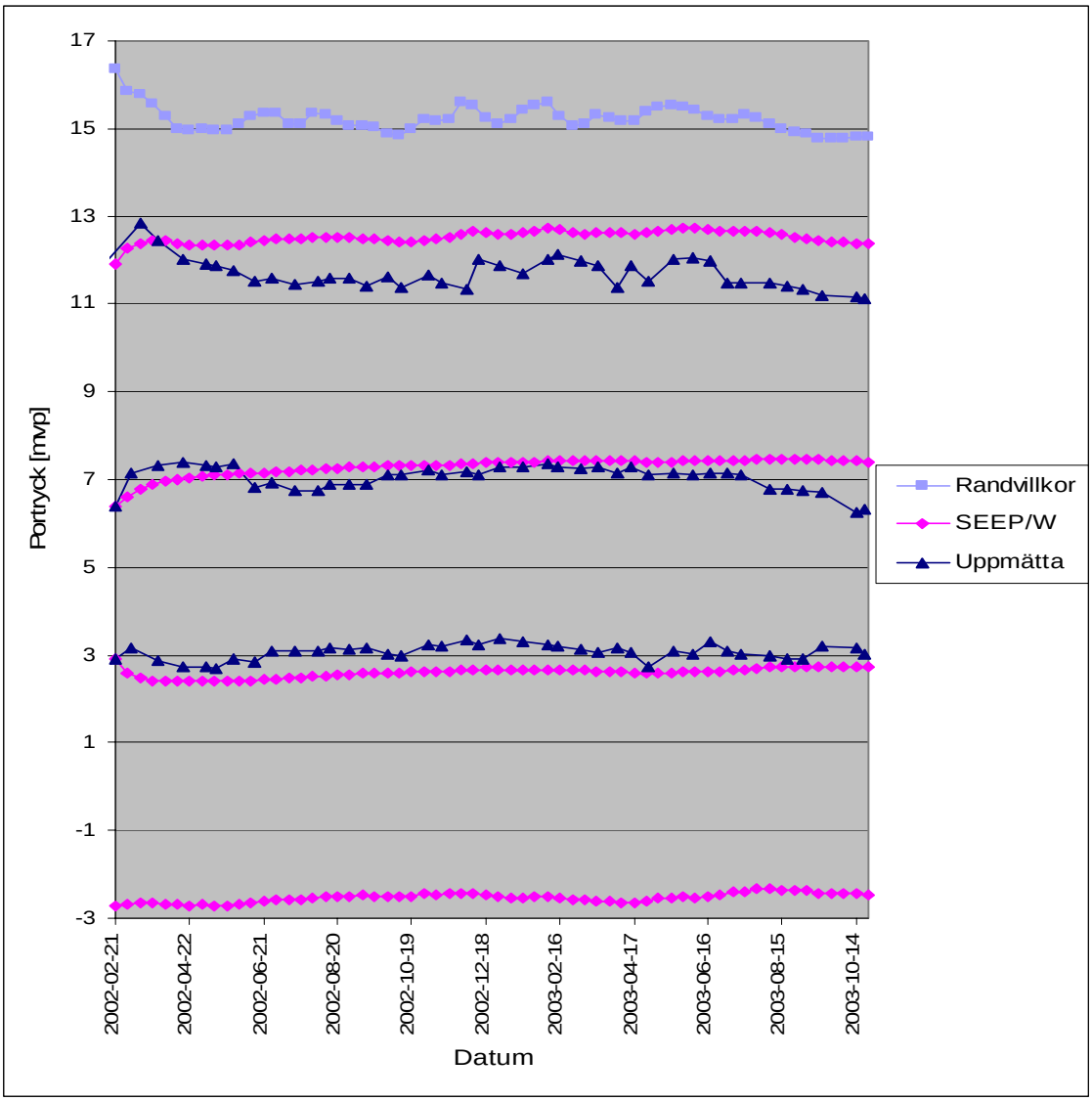
Figur 6.12 *Portrycksprofiler för de olika snitten i slänten gjorda 2003-01-07 där högra portrycksprofilen är närmast ån*

Undersökningen av överensstämmelse mellan simulerade och uppmätta portryck inleddes med en konstant infiltration på 2e-9 m/s och ingångsparametrarna var som de utvärderade. För detta fall blev överensstämmelsen relativt bra mellan den modellerade profilen och de uppmätta värdena. Tryckvärdena som erhölls i SEEP/W var dock lite låg på översta nivån och lite höga på de två undre nivåerna, trenderna på kurvorna var dock bra för alla nivåer. Det som främst skiljer är att de simulerade värdena i stort sett är konstanta över tiden medan de uppmätta värdena fluktuerar, se Figur 6.13



Figur 6.13 *Jämförelse mellan simulerade och uppmätta portryck för de olika nivåerna i leran. Modulen samt konduktiviteten är som utvärderat. Infiltrationen är konstant, 2e-9 m/s. Notera att nivåerna är omvända, dvs. det högsta portrycket i grafen är beläget lägst i jordprofilen.*

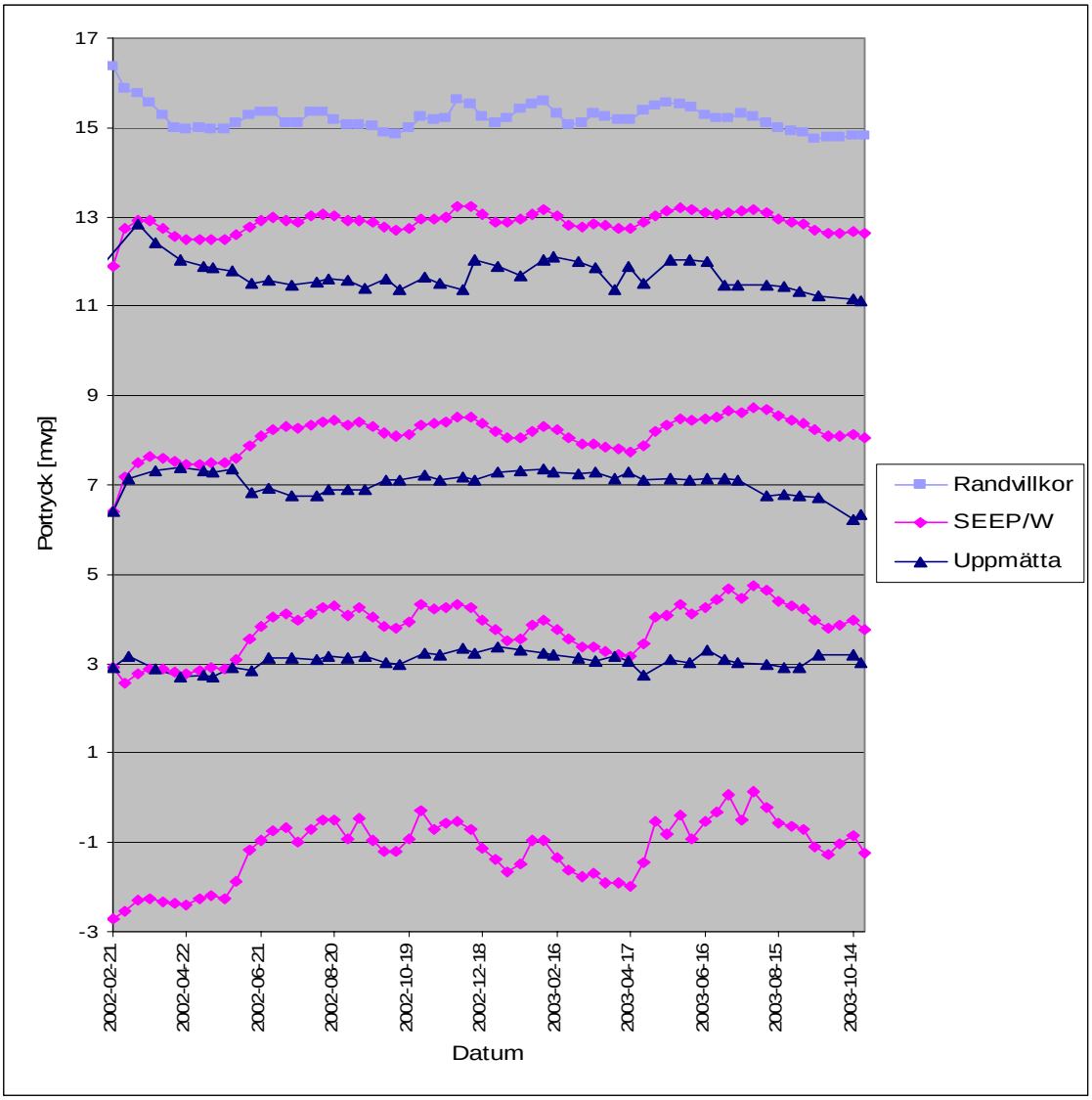
För att fluktuationerna skulle öka gjordes simuleringar där modulen höjdes med en faktor 10 samt att en varierande infiltrationsserie användes. Infiltration är ansatt vara 10 % av nederbörden. Konduktiviteten var fortfarande som den utvärderade. De värden som erhölls vid denna simulering var mycket lika körningen innan med konstant infiltration och modul som den utvärderats, fluktuationerna blev enbart lite större. För sättet som SEEP/W räknar ger alltså fluktuationer i det underlagrande friktionsmaterialet inte något tillräckligt snabbt genomslag så att det syns uppåt i profilen, se Figur 6.14.



Figur 6.14 *Jämförelse mellan simulerade och uppmätta portryck för de olika nivåerna i leran. Modulen är ökad med en faktor 10 och konduktiviteten som utvärderat. Infiltrationen är 10 procent av nederbörden. Notera att nivåerna är omvända, dvs. det högsta portrycket i grafen är beläget lägst i jordprofilen.*

Undersökningar gjordes även där ingångsparametrarna ändrades fritt för att se vad som krävdes för att få fluktuationer i modellen som motsvarade de uppmätta värdena. Vid ändring av konduktiviteten påverkas både trycknivån och fluktuationerna i

trycket. En ökning av konduktiviteten medför även att en större andel nederbörd kan infiltreras. När modulen ändras påverkas fluktuationerna. Det gick dock inte att få någon fullständig överstämmelse med de uppmätta värdena. De parametrar som gav fluktuationer av samma storleksordning var med en modul och konduktivitet som var 10 gånger högre än utvärderat tillsammans med en varierande infiltration där 38 procent av nederbörden infiltrerades. Trenden på trycket och fluktuationernas storlek var för analysen relativt bra men fluktuationerna följer inte de uppmätta värdena se Figur 6.15.



Figur 6.15 *Jämförelse mellan simulerade och uppmätta portryck för de olika nivåerna i leran. Modulen är ökad en faktor 10 samt att även konduktiviteten är ökad 10 gånger. Infiltrationen är 38 procent av nederbörden. Notera att nivåerna är omvända, dvs. det högsta portrycket i grafen är beläget lägst i jordprofilen.*

En ändring av konduktivitet med en faktor tio skulle kunna förklaras med hur den har utvärderats, fel vid försöken eller fel i hur SEEP/W räknar till följd av uppställningen av problemet. Andra orsaker kan vara att konduktiviteten i SEEP/W inte är definierad på samma sätt som för svensk standard.

6.2.3 Arbetsgång SLOPE/W

För att undersöka hur släntstabiliteten påverkas av höjda portryck genomfördes en rad olika stabilitetsberäkningar med SLOPE/W. Det gjordes även beräkningar av hur olika sätt att definiera portryck påverkade stabilitetsresultatet. Detta gjordes för att undersöka om det är försvarbart att använda SEEP/W för att definiera portrycken där den extra tiden vägs mot hur mycket tydligare eller tillförlitligare resultatet blir vid stabilitetsberäkningarna.

För båda undersökningarna gjordes stabilitetsberäkningar med kombinerad analys eftersom det är portrycken som beaktas. Vid beräkningarna för de olika fallen ändrades portrycken samt sättet de definierades på, men genomgående användes likadan parametrar för jordprofilerna enligt Tabell 6.3. Undersökningarna har genomförts som för en fördjupad utredning varför ingen hänsyn har tagit till anisotropi. Enligt Skredkommissionen (1995) är en säkerhetsfaktor för kombinerad analys godtagbar som är högre än 1,30-1,35 för en fördjupad utredning.

Tabell 6.3 Jordprofilens parametrar vid stabilitetsberäkningarna.

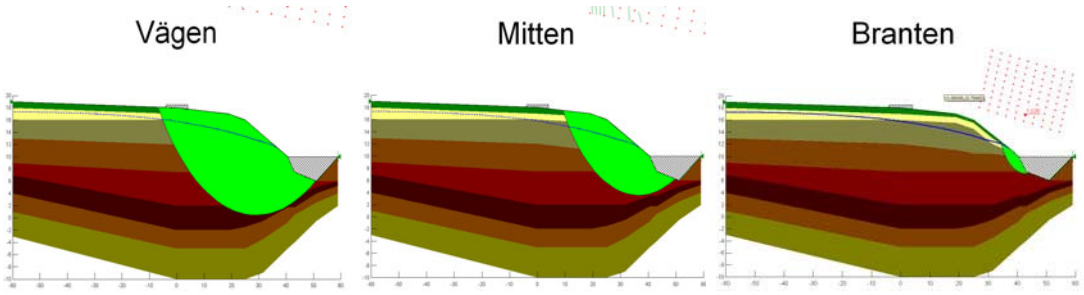
Material	*Jordmodell*	*Tunghet*	*Friktionsvinkel*	*Skjuv-hållfasthet*	*Ökning skjuvhållfasthet*
Fyllnadsmaterial	Mohr-Coulomb	20	30		
Silt	Mohr-Coulomb	18	32		
Lera1	CombinedSFnDatum	17	30*	24	1.4
Lera2					
Lera3					
Lera4					
Lera5					
Friktionsmaterial	Mohr-Coulomb	18	40		

** Inre friktionsvinkel*

Vid den första undersökningen gjordes fyra beräkningar för Yxan där portrycken definierades på olika sätt men i övrigt användes samma jordprofil. De fall som var av störst intresse att jämföra för att se hur olika sätt att definiera portrycken påverkar stabilitetsresultatet var:

1. Ange grundvattenytans läge i SLOPE/W
2. Definiera portryck i punkter i SLOPE/W
3. Importera portryck från en jämviktsanalys gjord i SEEP/W
4. Importera portryck från ett tidssteg i en transient-analys från SEEP/W

För varje fall med portrycksindata gjordes tre släntstabilitetsberäkningar för att få ett bättre underlag när de olika fallen skulle jämföras. Dessa tre glidytor benämndes Vägen, Mitten och Branten, se Figur 6.16.



Figur 6.16 De tre beräknade glidytornas utseende.

För fall 1 har portrycken angivits enbart genom att en grundvattenyta har definierats från vilken portrycken nedåt i profilen är hydrostatiska.

Vid fall 2 är portrycken definierade i punkter i profilen som grundas på uppmätta värden från området. Utifrån de angivna punkterna interpoleras sedan en hel portryckssituation fram i programmet.

För fall 3 har portrycksprofilen skapats i SEEP/W i en steady state-analys och sedan importerats till SLOPE/W. Ingångsdata för att generera portrycksprofilen i SEEP/W var från samma tidpunkt som användes för portrycken i fall 2.

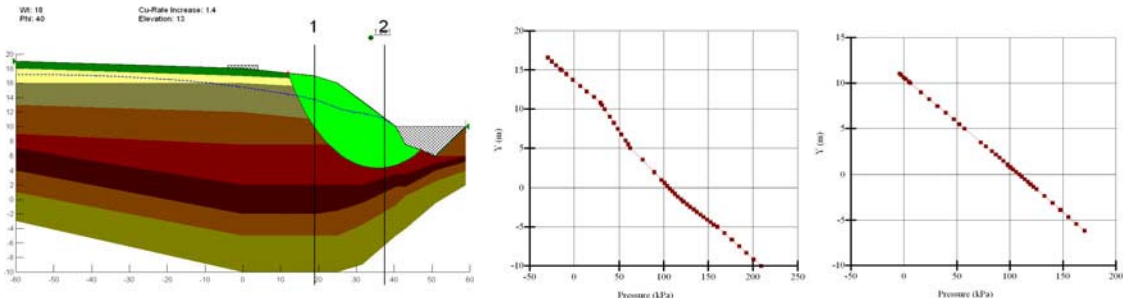
Även för fall 4 är portrycksdatan från SEEP/W men i detta fall är de från en transient analys. I den transienta analysen var steady state-filen från fall 3 indata och utgjorde startvärde för simuleringen. Portrycken som användes vid stabilitetsberäkningen är tagna efter ett simulerat år och är därmed likvärdigt vad gäller årstidsvariationer.

Jordprofilen vid den andra undersökningen var för de olika fallen från Yxan med parametrar enligt Tabell 6.3. För att undersöka hur höjda portryck påverkar släntstabiliteten användes en jämviktsanalys för att definiera portrycken för ett normalfall. Detta fall jämfördes med portryck definierade med:

- Jämviktsanalys med extremvärden
- Jämviktsanalys med extremvärden samt slänten eroderad
- Transient analys med simulerade extremvärden utifrån Yxan
- Transient analys med extremvärden där lerans mäktighet minskades

För att få ett bättre undersökningsresultat har för varje fall tre stabilitetsberäkningar genomförts där glidytorna benämnts Vägen, Mitten och Branten på samma sätt som för den första undersökningen ovan, se Figur 6.16. För att utreda farligaste fallet har vattenståndet i Bäveån hållits konstant eftersom en höjd vattennivå ökar passivtrycket vid stabilitetsberäkningarna. Dessa förhållanden motsvaras av att vattnet har sjunkit undan medan portrycken fortfarande är höga.

Normalfallet för undersökningen gjordes med en jämviktsanalys i SEEP/W där portrycken grundades på medelvärden från området Yxan. Trycket är i detta fall hydrostatiskt i släntens nedre del, se Figur 6.17 snitt 2. För släntkrönet och där slänten planar ut är det ett visst undertryck, se Figur 6.17 snitt 1.



Figur 6.17 Profil med snitt Tryck snitt 1 Tryck snitt 2

För extremfallen höjdes portrycken successivt tills det att någon del av slänten gick till brott.

I det första extremfall som skapades med en jämviktsanalys höjdes grundvattenytan med ungefär 0.6 meter till följd av att trycket i profilen hade höjts med 15 kPa. Detta är en kraftig ökning men den gjordes eftersom det från början var ett undertryck i profilen, se Figur 6.17 snitt 1. Vid beräkningarna var det dock ett visst övertryck i släntens nedre del men för övriga slänten var trycket nära på hydrostatiskt.

Det gjordes även en undersökning med samma portryckssituation som i fallet ovan men där dessutom delar av slänten eroderats, vilket skulle kunna uppstå vid ökat flöde i Bäveån.

För fallstudien av området Yxan gjordes ett extremfall som grundades på att nederbörden uppskattningsvis kan komma att öka med 30 procent till år 2100, enligt SMHI (2007c). Det var därför av intresse att se hur en sådan ökning skulle påverka släntstabiliteten för området. För detta fall ökades infiltrationen men den främsta påverkan på portrycken var det ökade trycket i det underlagrande friktionsmaterialet, eftersom en stor andel av nederbörden infiltreras direkt till detta skikt. För analysen höjdes trycket i friktionsmaterialet med 15 procent vilket är en betydligt större ökning än vad det är rimligt att en 30 procentig ökning av nederbörden skulle orsaka. Ökningen gjordes för att det var ett undertryck i friktionsmaterialet för Yxan och ett fall med högre tryck var av större intresse att undersöka. Portryckshöjningen gjordes för detta fall med en transient analys där släntstabiliteten undersöktes efter det att trycken i profilen hade ställt in sig för de nya högre trycken i friktionsmaterialet.

Det sista extremfallet som undersöktes var en profil som i de övre skikten hade samma utseende som Yxan men där lerans mäktighet enbart var 15 meter istället för 22 meter. Detta är intressant eftersom variationer i det underlagrande friktionsmaterialet då slår igenom i profilen mycket snabbare vid tryckhöjningar. Portrycken höjdes därför med en transient analys där det undersöktes hur ett övertryck på 15 kPa skulle påverka stabiliteten.

6.2.4 Resultat SLOPE/W

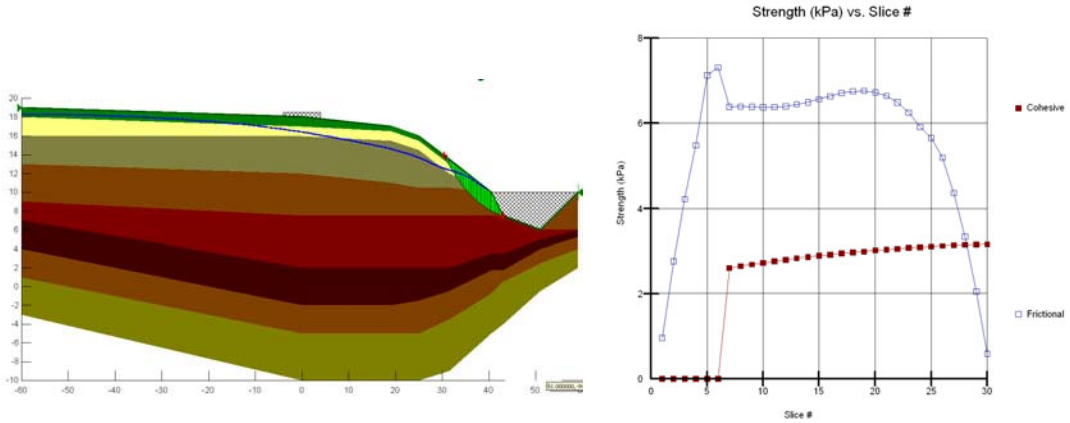
Resultaten från släntstabilitetsberäkningarna där portrycken hade definierats på olika sätt blev generellt överensstämmande enligt Tabell 6.4.

Tabell 6.4 Säkerhetsfaktorer för de fyra olika sätten som portrycken definierats på.

	Fall 1	*Fall 2*	*Fall 3*	*Fall 4*
Glidytans läge	Gvy definierad	Portryck definierade i punkter	Steady state-fil	Transient fil
Vägen	1.27	1.20	1.25	1.27
Mitten	1.18	1.12	1.19	1.21
Branten	1.09	1.04	1.04	1.06

Överlag är resultaten väl överensstämmande, vilket visar att trycken i profilen är nära hydrostatiska för den aktuella tidpunkten eftersom även fall 1 är bra överensstämmande där trycken är hydrostatiska. För den undersökta tidpunkten är trycket högre än normalt med ett visst övertryck i nedre delen av slänten vilket ger de låga säkerhetsfaktorerna. Fall 2 till 4 visar att de är likvärdiga sätt att definiera portrycken på även om värdena för fall 2 blir cirka fem procent lägre för de stora glidytorna Vägen och Mitten.

Samtliga fall med extremvärden beskriver scenarier som leder till att slänten går till brott. Det var den branta delen närmast Bäveån som utgjorde det farligast fallet vilket var logiskt eftersom det var för denna del av slänten som portrycken var högst. Ytterligare orsaker att fallet närmast ån var farligast var att den glidytan gick grundast vilket medförde att hela glidytan för dessa fall var dränerad, se Figur 6.18. I diagrammet visas hållfastheten för friktion och kohesion för varje lamell av glidytan. Förenklat kan grafens utseende förklaras med att när kohesionen är noll är det friktionsmaterial som i början av grafen, för övriga grafen är det sedan lera. För den del av glidytan som friktionen för leran är större än noll är glidytan dränerad.



Figur 6.18 Grund glidyta vid branten *Glidytan helt dränerad*

Resultaten visar att när nedre delen av slänten går till brott är även värdena på de andra två glidytorna mycket lika för de olika fallen, se Tabell 6.5.

Tabell 6.5 Säkerhetsfaktorer för normalvärdet samt de fyra olika extremfallen med höga portryck

	Normalvärde	Extremvärden			
Glidytans läge	Jämviktsanalys	Jämviktsanalys	Jämviktsanalys Erosion	Transient 30% nederbördsökning	Transient Mindre lermäktighet
Vägen	1.24	1.21	1.19	1.23	1.16
Mitten	1.20	1.15	1.12	1.16	1.11
Branten	1.12	0.98	1.01	0.97	0.96

För extremvärdet där portrycken skapades med en jämviktsanalys visade resultaten hur mycket trycket i det underlagrande friktionsmaterialet kunde öka innan slänten skulle gå till brott. För Yxan var det en höjning med 15 kPa vilket motsvara ett visst övertryck.

Även för fallet där nedre delen av slänten hade eroderats gick slänten till brott efter en tryckökning med 15 kPa i det underlagrandefriktionsmaterialet. Att det krävdes en lika stor tryckhöjning för detta fall berodde på att grundvattenytan sänktes i den nedre delen av slänten när släntens utformning ändrades. För de två större glidytorna minskade däremot säkerheten ytterligare eftersom passivtrycket minskats.

För fallet där portrycksökningen har gjorts med en transient analys som beskriver en ökning av nederbörden med 30 procent blir resultaten mycket lika fallet gjord med en jämviktsanalys. Portryckssituationerna för de båda fallen är alltså väl överensstämmande. Eftersom indatan för detta fall var från en transient analys kunde dock även tidsaspekter för portryckssituationen analyseras. Detta visade att om den 30 procentiga nederbörden hade skett momentant hade det tagit drygt 14 månader innan slänten hade gått till brott (aktuella tillståndet uppstått).

För det sista fallet, där lermäktigheten var mindre, gjordes en transient analys. Även för detta fall var det den nedre delen av slänten som gick till brott, vid det tillståndet var dessutom säkerheten för de två större glidytorna lägre än för de övriga extremfallen. Det som gör fallet med ett vattenförande friktionsmaterial eller skikt högt upp i profilen så farligt är att för det simulerade fallet gick slänten till brott efter drygt 30 dagar med ett övertryck på 15 kPa i friktionsmaterialet på 15 meters djup. Detta kan jämföras med fallet innan med ett övertryck på 25 kPa i friktionsmaterialet som låg 7 meter djupare tog det 14 månader.

7 Diskussion

Att ange grundvattenytans läge utgör en överslagsmässig metod för släntstabilitetsberäkning vad gäller Yxan eftersom förhållandena i slänten inte är hydrostatiska. Det kan ändå vara en bra start vid undersökningarna av stabiliteten eftersom tillvägagångssättet att rita upp profilen och ange grundvattenytan är ett relativt snabbt tillvägagångssätt och resultatet ger en bra indikation på säkerhetsfaktorn.

Att definiera portryck i punkter är ett bra förfarande om portrycksmätningar har gjorts i ett antal punkter strategiskt placerade i slänten. Det går även relativt snabbt att använda denna beräkningsgång. Vid definition av portrycken på detta sätt måste dock en nollnivå anges som bestämmer grundvattenytan läggas in. Nackdelen med att ange portrycken på detta sätt är att det är svårt att få en uppfattning om hur portrycksprofilen som skapas ser ut. Vid extrema förhållanden kan detta leda till direkt felaktiga portryckssituationer. Det blir därför extra viktigt att granska hur portrycket utmed glidytan ser ut. Detta görs för att se om det finns några avvikelser från det förväntade utseendet vilket kan indikera att något är fel vid beräkningen.

Tillvägagångssättet där portrycken definieras med en jämviktsanalys från SEEP/W ger en tydlig bild av portrycksprofilen eftersom den överskådligt kan granskas i SEEP/W innan den importeras till SLOPE/W. Om det är något som inte stämmer i profilen går det relativt snabbt att ändra. Vidare kan olika portrycksprofiler skapas med till exempel normalvärden och extremvärden. Inverkan av portrycksökningen går sedan tydligt att granska genom att göra en släntstabilitetsberäkning för vardera fall. Det enda som behöver ändras mellan körningarna i SLOPE/W är indatafilen, vilket gör förfarandet snabbt. Denna beräkningsgång lämpar sig väl när olika situationer skall jämföras eftersom ingångsdatan är tydlig separat och sedan blir inverkan av ändringen konkret vid stabilitetsberäkningarna. Det kan ta lite längre tid att använda detta tillvägagångssätt om enbart en portryckssituation skall användas, men skall olika fall jämföras tjänas den tiden snabbt in, samtidigt som överskådligheten och därmed tillförlitligheten ökas.

Att ange portrycken i punkter i SLOPE/W är likartat med sättet som de anges på vid en jämviktsanalys i SEEP/W. Fördelen med att använda SEEP/W är att portrycksprofilen simuleras fram utifrån de definierade punkterna i profilen, grundvattenytans läge måste inte definieras vilket som krävs när portrycken anges i punkter direkt i SLOPE/W eftersom en nollnivå måste läggas in. Vid användningen av SEEP/W blir det dock en del merarbete eftersom andra parametrar måste definieras än i SLOPE/W. Profilens utseende följer däremot med vid växlingen mellan programmen.

Användandet av en transient analys från SEEP/W gör att en längre simulering av portryck kan undersökas, där sedan maximala portryck används vid beräkningen av släntstabiliteten. Detta är möjligt eftersom alla tidssteg kan användas som ingångsdata till SLOPE/W. Vid känslighetsanalyser kan två släntstabilitetsberäkningar göras med portryck från samma transienta analys vilket gör det möjligt att undersöka dels hur mycket släntstabiliteten har minskat för en portryckshöjning och dels hur lång tid den ökningen har tagit.

Vid jämförelse av en jämviktsanalys och en transient analys som indata till SLOPE/W blir det ingen skillnad i resultatet i sig. Tidsaspekten som finns i den transienta analysen kommer inte in i stabilitetsberäkningen direkt. Utförs däremot två stabilitetsberäkningar från samma transienta analys så är den gångna tiden samt portrycksförändringen mellan tillfällena kända. En transient analys kräver dock bättre utvärderade parametrar och uppställningen av problemet är mer tidskrävande än för en jämviktsanalys.

8 Slutsatser

Vid beräkningar av stabiliteten för en slänt är portrycket av stor betydelse. En ökning av portrycket medför sämre hållfasthet. Detta gör att det är av intresse att simulera portrycksvariationer i en lerprofil med hjälp av numeriska modeller. Detta har genomförts med datorprogrammet SEEP/W. Vidare har stabilitetsundersökningar gjorts med SLOPE/W.

8.1 SEEP/W

Vid beräkningar med SEEP/W är det viktigt att parametrar, randvillkor och jordprofil är rätt definierade. Är någon parameter felaktigt definierad i någon del av profilen kommer hela profilens utseende bli felaktigt. Eftersom det är viktigt att ingångsparametrarna till SEEP/W, hydraulisk konduktivitet och kompressionsmodul, är rätt definierade innebär det att det är av största vikt att relevanta undersökningar är gjorda för att överensstämmelse mellan använd jordprofil och verklighet skall uppnås.

De gjorda analyserna av hur uppmätta årstidsfluktuationer går att simulera fram med SEEP/W visar att en fullständig överensstämmelse inte är möjlig att uppnå. Trenderna för portrycken på de olika nivåerna stämmer väl överens men det är inte möjligt att helt beskriva fluktuationerna med SEEP/W. Detta trots att ingångsparametrarna modifierats för att optimera överensstämmelsen.

Vid analyserna framgår det att den hydrauliska konduktiviteten främst påverkar trycknivåerna medan kompressionsmodulen har en större inverkan på fluktuationerna. Detta är en avvikelse från svensk beräkningspraxis där det inte medför någon skillnad om den hydrauliska konduktiviteten eller kompressionsmodulen ändras eftersom de multipliceras i formeln för konsolideringskoefficienten (c_v). Någon härledning av skillnaderna har tyvärr inte kunnat genomföras eftersom programmets räknekärna ej varit tillgänglig.

De gjorda fallstudierna visar på att portrycksprofilens utseende nästan uteslutande styrs av tryckvariationerna i det underlagrande friktionsmaterialet. Infiltrationen genom lerprofilen i västra Sveriges lågpermeabla leror har alltså mycket liten inverkan. Däremot kan portrycken ändå höjas snabbt vid intensiv nederbörd genom att infiltration sker direkt till det underlagrande friktionsmaterialet från vilket trycket sedan sprids uppåt i lerprofilen.

En felkälla vid undersökningarna är att det i SEEP/W enbart går att definiera en modul. Detta ger upphov till fel eftersom vissa simuleringar berör både M_0 och M_L. Det största felet uppstår dock när tryckhöjningar sker i ett underlagrande friktionsmaterial som medför en portrycksökning i lerprofilen. Portrycksökningen ger upphov till en avlastning vilket innebär att det är avlastningsmodulen som är styrande vilken är betydligt högre än M_0. Vid analyserna syns det genomgående att de uppmätta värdena stiger betydligt snabbare än de sjunker, se Figur 6.8. Det är den betydligt högre avlastningsmodulen som gör att trycket stiger snabbare. Studeras de simulerade värden med detta i åtanke syns det att portrycken sjunker på ett mycket likartat sätt som de uppmätta värdena. Ökningarna vid simuleringarna blir dock inte alls lika branta som för de uppmätta värdena eftersom M_0 är styrande vid ökningarna istället för avlastningsmodulen, se Figur 6.8.

8.2 SLOPE/W

Vid valet av sätt att definiera portryck i SLOPE/W är det främst hur mycket extra information som är av intresse som är avgörande. Resultaten i SLOPE/W blir likvärdiga för samtliga undersökta sätt när trycket är hydrostatiskt. Övergripande blir undersökningarna mer tidskrävande och kostsamma i takt med att de blir mer överskådliga och därmed säkrare. Utförligt definierade portryck ökar även möjligheterna för känslighetsanalyser. Förenklat kan det ställas upp enligt följande principfall:

- Hydrostatiskt tillstånd
    - Definiera grundvattenytans läge.
- Icke hydrostatiskt tillstånd
    - Definiera portrycken i punkter direkt i SLOPE/W.
- Icke hydrostatiskt komplicerat tillstånd eller att olika fall skall undersökas
    - Definiera portrycken i SEEP/W i en jämviktsanalys.
- Icke hydrostatiskt komplicerat tillstånd eller att olika fall skall undersökas där även tidsaspekter beaktas
    - Definiera portrycken i SEEP/W i en transient analys.

För släntstabilitetsberäkningar med kombinerad analys har portrycken stor inverkan. Förfarandet att enbart ange grundvattenytans läge och därmed anta att trycken är hydrostatiska kan leda till helt missvisande resultat, även enskilda mätningar kan var missvisande varför större vikt vid portrycksituationen i regel bör tas. Det är mycket viktigt att mäta portrycken under en längre tid eller på ett bättre sätt än idag kunna prognostisera portrycken för att veta hur stora årstidvariationerna är. Som undersökningarna visar kan höjda tryck i ett underlagrande friktionsmaterial göra att en sländ går till brott även om tryckhöjningen råder under en kortare tid.

9 Förslag till fortsatta undersökningar

För att portrycken skulle beaktas på ett bättre sätt vid stabilitetsberäkningar borde det sätt de prognostiseras på förbättras. I dagsläget prognostiseras portryck enligt Skredkommissionen (1995) genom användningen av referensrör. Systemet fungera dock inte särskilt bra vilket har medfört att det inte används i någon större utsträckning. Problemen beror mycket på att referensrören är glest placerade varför det i många fall inte går att göra en kvalitativ jämförelse med det undersökta området. För flertalet referensrör är det heller inte klargjort hur jordprofilen ser ut vilket är en mycket viktig information för att en god jämförelse skall kunna genomföras.

Ett nytt system med referensrör skulle behöva upprättas där jordprofilens utseende och akviferens utbredning utförligt undersöktes. För dessa stationer skulle sedan portrycken behöva mätas under en längre tid samtidigt som lokal nederbörd för området registrerades. Med sådana data skulle portrycken vid stabilitetsberäkningar kunna användas med t ex en hundraårsnivå, vilket i många fall är praxis vid dimensionering med avseende på t ex nederbörd eller vidhastighet.

Följaktligen skulle det bli väldigt kostsamt att upprätta dessa referensstationer men med utgång från dem skulle portryck på ett betydlig bättre sätt kunna prognostiseras. Innan ett sådant projekt skulle kunna påbörjas måste utförliga undersökningar genomföras för att klargöra på vilket sätt en prognostisering kan genomföras på bästa sätt med hjälp av de nya referensstationerna.

10 Referenser

Berntson, J. A. (1983): *Portrycksvariationer i leror i Göteborgsregionen*. Statens geotekniska institut, Rapport No 20, Linköping

Sällfors, G. (2001): *Geoteknik, Jordmateriallära – Jordmekanik.* Chalmers tekniska högskola, Göteborg

Skredkommissionen (1995): *Anvisningar för släntstabilitet.* Statens geotekniska institut, Rapport 3:95, Linköping

Knutsson, G., Morfeldt, C-O. (1995): *Grundvatten teori & tillämpning*. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm

Grip, H., Rodhe, A. (2000): *Vattnets väg från regn till bäck***.** Forskningsrådens Förlagstjänst, Karlshamn

SMHI (2007a): http://www.smhi.se/sgn0106/klimat/vadklim.htm

SMHI (2007b): http://www.smhi.se/sgn0106/klimat/konsekvenser.htm

SMHI (2007c): http://www.smhi.se/sgn0106/if/rc/documents/Nbd1961-2100.pdf

IPCC (2001). *Climate change 2001: The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Third Assessment Report.

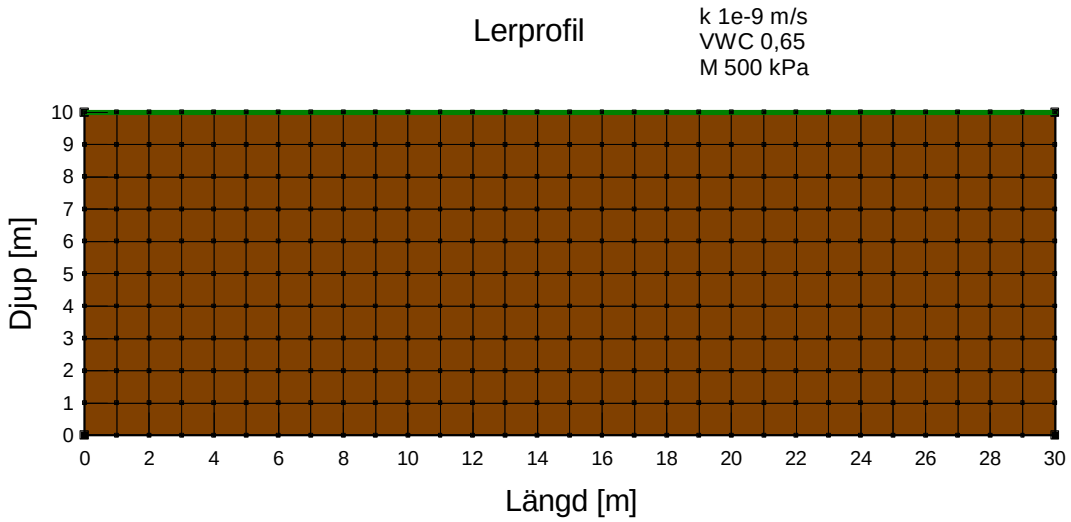
IPCC (2002): *Climate change and biodiversity*. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Technical Paper V.

Krahn, J (2004a): *Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology*. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Canada

Krahn, J (2004b): *Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology*. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Canada

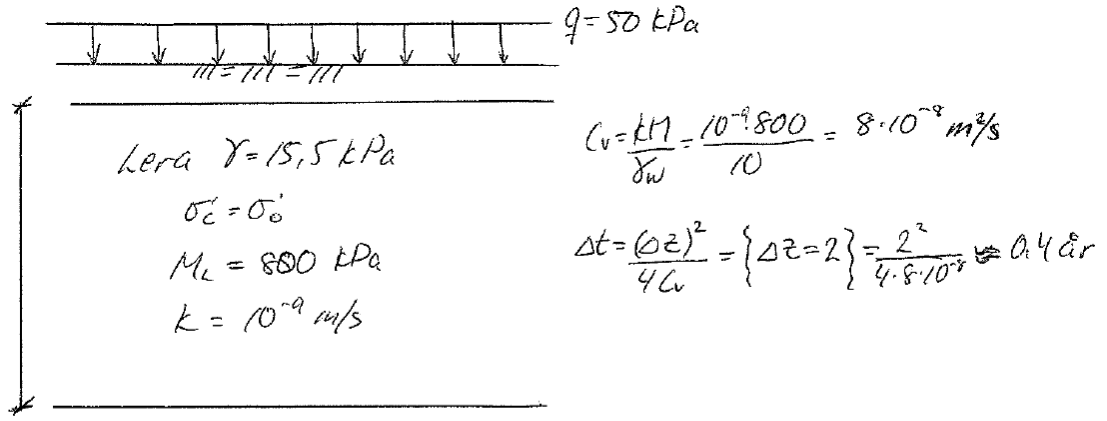
Bilaga 1

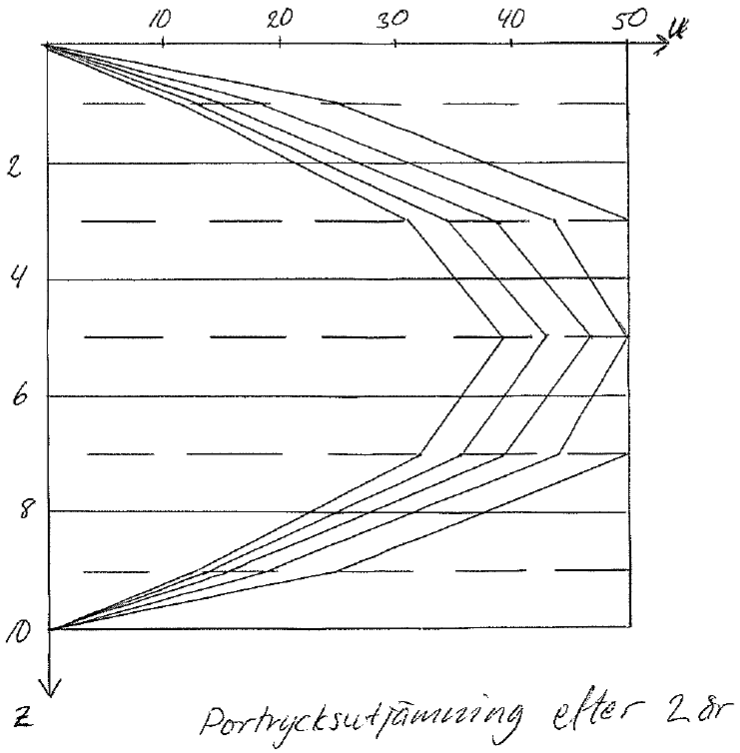
Lerprofil med tillhörande parametrar som användes vid jämförande av porövertrycksutjämning samt känslighetsanalys för område Korpemyren.



Bilaga 2

Beräkning Helenelunds metod med en antagen utbredd last på 50 kPa.

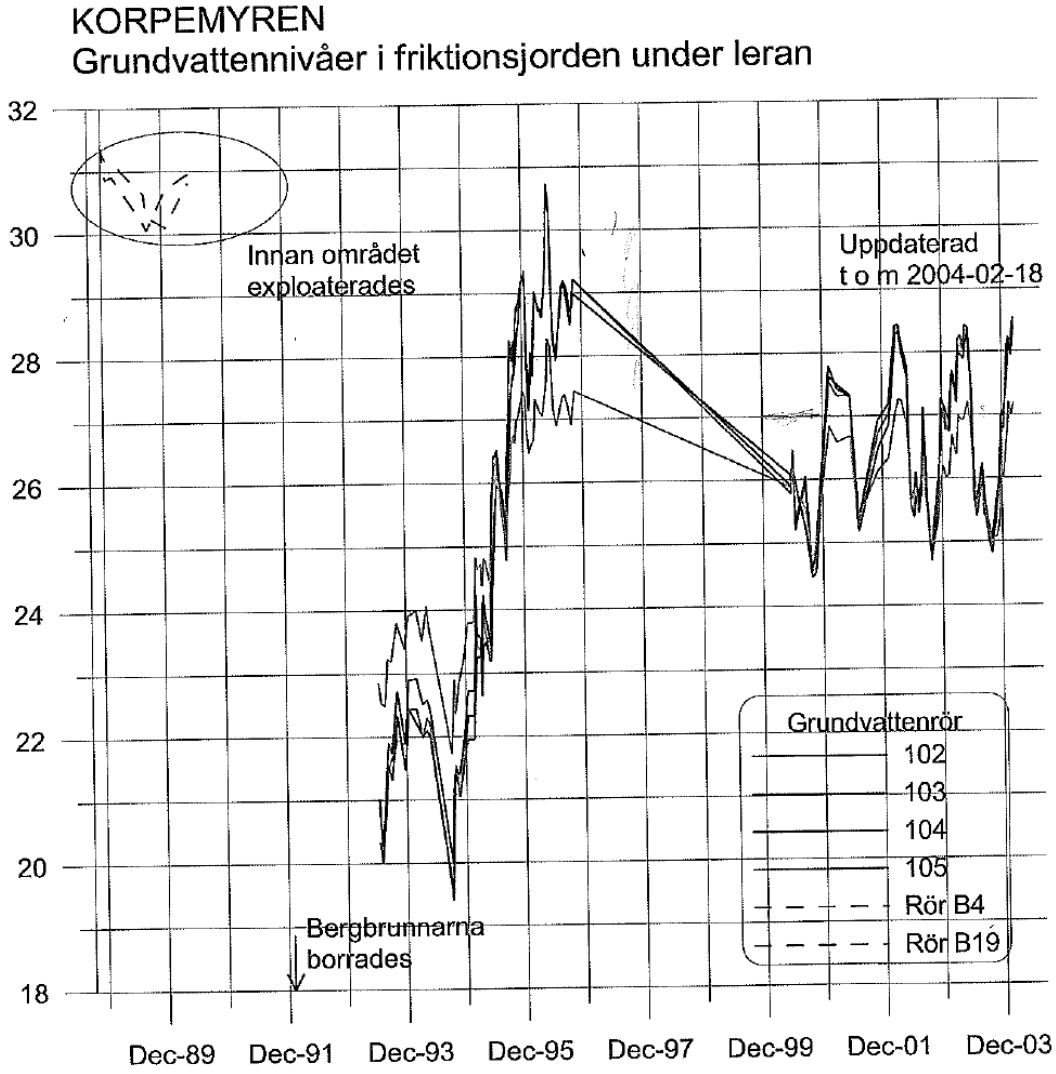




Portrycksutjämning efter 2 år

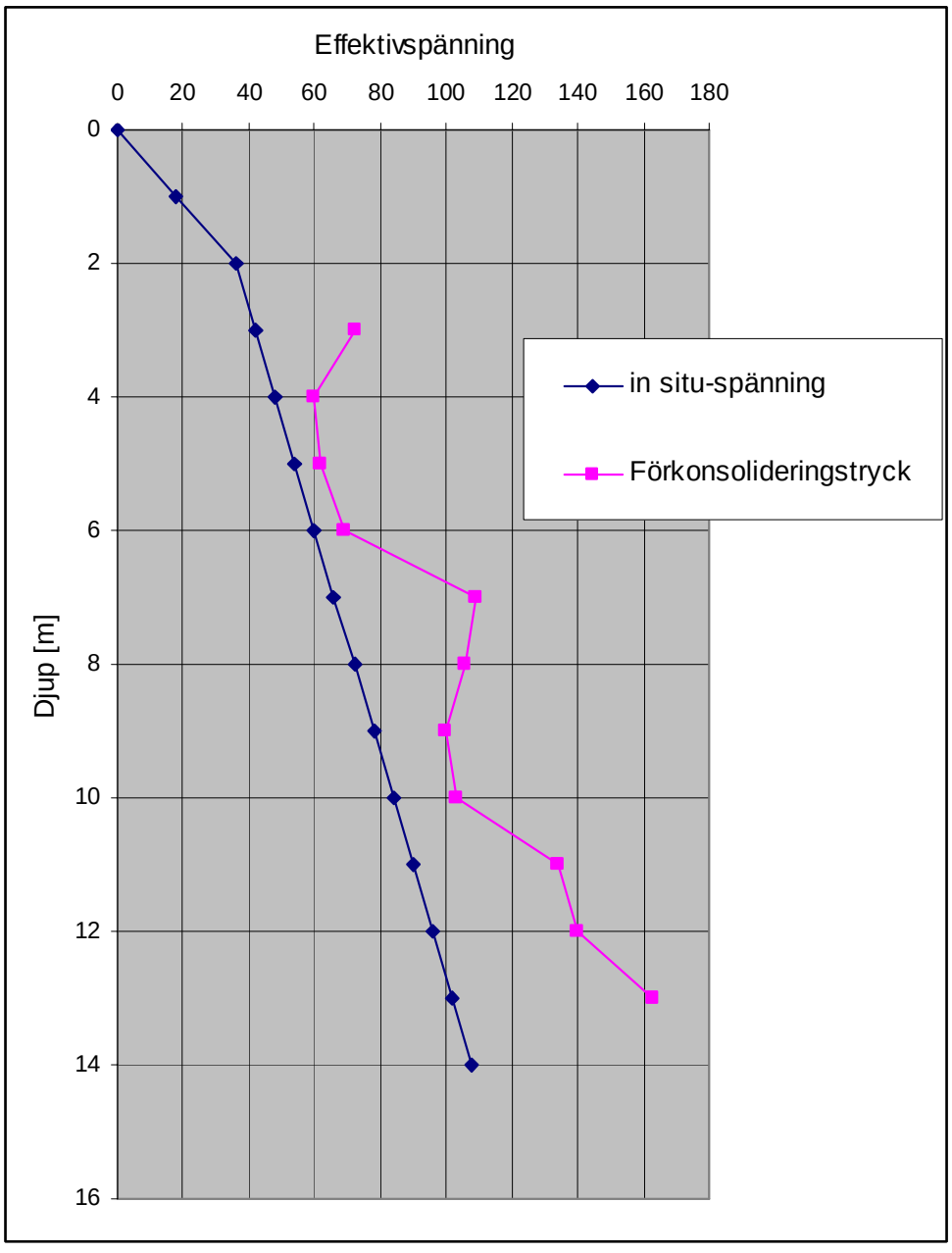
Bilaga 3

Grundvattnets förändring över tiden för området Korpemyren. Innan området dränerades 1991 var fluktuationen relativt liten i jämförelse med fluktuationerna år 2000 och framåt.



Bilaga 4

Spänningsdiagram för område Korpemyren, vilket påvisar att leran är överkonsoliderad. Grundvattenytan har ansatts till två meters djup.



Bilaga 5

Spänningsdiagram för området Yxan. Notera att CRS-försöken är gjorda 150 meter från slänten. Djupet ned till berg är annorlunda, 12 respektive 23 meter, vilket innebär annat spänningsförhållande i jorden men dessa undersökningar är applicerade på slänten. Grundvattenytan ansätts till två meters djup.

