รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์และออกแบบโพรงที่เกิดจากการผลิตเกลือ โดยวิธีละลายในชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขในคอมพิวเตอร์

(Design Optimization and Analysis of Solution Cavern Field in Salt Formations in the Northeastern Part of Thailand: Using Time-Dependent Finite Element Methods)

ผู้วิจัย

ดร.กิตติเทพ เฟืองขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2543
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2543

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2543 ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจาก นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย และ นางปราณี กระจ่างโพธิ์ ในการตรวจสอบความถูกต้องของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2543

บทคัดย่อ

ความเป็นไปได้ของการทำเหมืองเกลือแบบละลายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ได้นำมาศึกษาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม GEO 3 พื้นที่ในจังหวัดชัยภูมิได้ถูกเลือกขึ้นมาเป็นแบบจำลองตัวแทน คือ บ้านโคกแฝก บ้านวังกะอาม และบ้านโคกสว่าง การวิเคราะห์จะมุ่งไปที่ความเหมาะสมของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบโพรงที่ถูกละลายในชั้นหินเกลือ ซึ่งจะรวมไปถึงเสถียรภาพทางกลศาสตร์และการเก็บกักของชั้นหินที่ใช้ ตัวโพรงที่ออกแบบจะต้องมีขนาดเหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจ ป้องกันการทรุดตัวของผิวดิน และการหดตัวของโพรง ข้อมูล ประสบการณ์ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางด้านกลศาสตร์หินเกลือได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ตัวโพรงจะถูกกำหนดเป็นรูปทรงกระบอกในแนวตั้งและเรียงกันอยู่ในแนวราบโดยมีระยะห่างเท่ากัน ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ระบุว่าโพรงละลายในหินเกลือที่บ้านวังกะอามและบ้านโคกแฝกควรจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 80 เมตร ความสูงเท่ากับ 60 เมตร ระยะห่างระหว่างโพรงไม่น้อยกว่า 240 เมตร โพรงที่บ้านวังกะอามควรจะลึก 180 เมตร ที่บ้านโคกแฝกควรจะลึก 240 เมตร ส่วนที่บ้านโคกสว่างโพรงในหินเกลือควรจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เมตร ลึก 140 เมตร และสูง 40 เมตร ระยะห่างระหว่างโพรงไม่ควรจะน้อยกว่า 150 เมตร ด้วยค่าการออกแบบดังกล่าวทั้งหมดการทรุดตัวของผิวดินคาดว่าจะน้อยกว่า 8 นิ้ว หลังจาก 100 ปีของอายุของโพรง ปริมาณการขุดเกลือจะได้ประมาณ 5,000,000 ลูกบาศก์เมตร ต่อหนึ่งตารางกิโลเมตรของพื้นที่ทำเหมือง ผลจากการคำนวณยังระบุว่าความหนาและความลึกของชั้นหินเกลือจะเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อรูปร่างของโพรง ปริมาณเกลือ และเสถียรภาพของตัวโพรงที่ถูกละลายขึ้น

Abstract

A feasibility study for the construction of solution mined caverns in rock salt formations in northeastern Thailand has been carried out using a time-dependent finite element code GEO. Three areas with different geologic settings in Chaiyapum Province are selected as representative models; Ban Kok Faek model, Ban Wang Ka-Am model, and Ban Kok Sawang model. The computer analysis is aimed at determining the suitable design parameters for the salt caverns with long-term mechanical stability and hydrological integrity of the hosted rocks. An attempt is also made at achieving economically-justified extraction ratio for the caverns while minimizing the ground surface subsidence and cavern closure. Available geological data reported elsewhere are used in the analysis. Where applicable, supplementary theories and concepts on salt mechanics, as well as, in-house experience and data base on rock properties have been applied in the computer simulation. The cavern fields are assumed to be an array of identical up-right cylindrical caverns mined in an infinite square grid. The results suggest that the solution caverns in Ban Wang Ka-Am and Ban Kok Faek areas should be mined with diameter and height of 80 meters and 60 meters, respectively. The minimum spacing between the adjacent caverns is 240 meters. Depth of the cavern roof should be about 180 meters for Ban Wang Ka-Am area, and about 240 meters for Ban Kok Faek area. For Ban Kok Sawang, the caverns should be 60 meters in diameter, 140 meters in depth, and 40 meters in height. The spacing between the adjacent caverns should be at least 150 meters. Under the design parameters above, the ground surface subsidence should be less than 8 inches after 100 years of operation, while the extraction ratio would be about 5 million cubic meters per one square kilometer of the cavern field. The investigation implies also that thickness and depth of the hosted salt are the critical factors influencing the configurations and stability of the cavern field.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อ ..... ข
Abstract ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญภาพ ..... *ฌ*
บทนำ 1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
วัตถุประสงค์ 2
ขอบเขตของการวิจัย 3
วิธีการดำเนินการวิจัย 4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
บทที่ 1 ชั้นหินเกลือที่นำมาศึกษา 6
บทที่ 2 ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา 21
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 23
3.1 ลักษณะต่าง ๆ ของแบบจำลอง 23
3.2 การออกแบบ Mesh 24
3.3 ความเค้นในหิน (In-situ Stress) 35
บทที่ 4 ผลของการคำนวณ *36*
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลของการคำนวณ 77
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ 79
บรรณานุกรม 81
ภาคผนวก
ผ-1 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-001, K-014, K-016, K-021, K-022, K-024, K-026, K-028, K-030, K-034, K-075, K-077, K-096, K-098 และ K-102 83
ผ-2 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-001 สำนักงานชลประทาน ถนนวัฒนา อ.เมือง จ.นครราชสีมา 84
ผ-3 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-014 บ้านบึงตะโก อ.เมือง จ.นครราชสีมา 85

หน้า

ผ-4 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-016 วัดสระจรเข้ อ.โนนไทย จ.นครราชสีมา 86
ผ-5 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-021 บ้านพูม อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา 87
ผ-6 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-022 บ้านโนนน้อย อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา 88
ผ-7 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-024 บ้านโนนมูล อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา 89
ผ-8 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-026 บ้านผาไล อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา 90
ผ-9 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-028 วัดหนองจอก อ.เมือง จ.นครราชสีมา 91
ผ-10 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-030 บ้านโกฮอง อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา 92
ผ-11 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-031 บ้านโนนระเวียง อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 93
ผ-12 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-034 วัดตำแย อ.พิมาย จ.นครราชสีมา 94
ผ-13 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-075 โรงเรียนวัดพระยานิมิตร บ้านหนองขาม อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา 95
ผ-14 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-077 วัดขาม อ.ขามสะแกแสง จ.นครราชสีมา 96
ผ-15 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-096 700 เมตรทางทิศใต้ของ k-080 บ้านประคาม อ.คง จ.นครราชสีมา 97
ผ-16 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-098 บ้านประคาม ต.บ้านพราง อ.คง จ.นครราชสีมา 98
ผ-17 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-102 ประมาณ 1 ก.ม. ของ k-19 อ.จักราช จ.นครราชสีมา 99
ผ-18 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-002, K-005, K-006, K-044, K-046 และ K-083 สำหรับรูปที่ ผ-19 ถึงรูปที่ ผ-24 100
ผ-19 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-002 ถนนสายหนองคาย-โพนพิสัย อ.เมือง จ.หนองคาย 101
ผ-20 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-005 อ.หนองหาน จ.อุดรธานี 102
ผ-21 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-006 บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี 103
ผ-22 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-044 วัดหาดปทุม อ.ศรีเชียงใหม่ จ.หนองคาย 104
ผ-23 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-046 วัดรังสีมุกดาราม อ.ศรีเชียงใหม่ จ.หนองคาย 105
ผ-24 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-083 บ้านหนองประจักร อ.เมือง จ.อุดรธานี 106
ผ-25 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-003, K-007, K-043 และ K-055 สำหรับรูปที่ ผ-26 ถึงรูปที่ ผ-29 107
ผ-26 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-003 วัดสว่างภูมิดล อ.สว่างแดนดิน จ.สกลนคร 108
ผ-27 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-007 อ.บ้านดุง จ.อุดรธานี 109
ผ-28 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-043 วัดสุทธิมงคล อ.พรรณานิคม จ.สกลนคร 110

หน้า

ผ-29 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-055 วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร 111
ผ-30 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-004 สำหรับรูปที่ ผ-31 112
ผ-31 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-004 วัดอรัญญิกาวัตร อ.เมือง จ.นครพนม 113
ผ-32 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-010, K-037, K-050, K-053, K-054, K-059, K-063, K-095 และ K-109 สำหรับรูปที่ ผ-33 ถึงรูปที่ ผ-41 114
ผ-33 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-010 วัดสามัคคี อ.ยางตลาด จ.กาฬสินธุ์ 115
ผ-34 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-037 บ้านหัวขัว อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 116
ผ-35 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-050 วัดไทรทอง บ้านคำไฮ่ อ.เมือง จ.ขอนแก่น 117
ผ-36 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-053 วัดป่าอรัญวาสี บ้านเหล่านาดี อ.เมือง จ.ขอนแก่น 118
ผ-37 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-054 วัดชัยศรี บ้านสวัทถี อ.เมือง จ.ขอนแก่น 119
ผ-38 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-059 วัดศรีบุญเรือง บ้านตุ้ม อ.เมือง จ.ขอนแก่น 120
ผ-39 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-063 วัดโพธิ์ชัย บ้านนาข่า อ.มัญจาคีรี จ.ขอนแก่น 121
ผ-40 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-095 วัดบ้านหนองโข อ.เชียงยืน จ.มหาสารคาม 122
ผ-41 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-109 หน้าหอประชุม อ.เมือง จ.ขอนแก่น 123
ผ-42 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-011, K-012, K-013 และ K-018 สำหรับรูปที่ ผ-43 ถึงรูปที่ ผ-46 124
ผ-43 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-011 วัดไทยศรีมงคล อ.เมือง จ.ยโสธร 125
ผ-44 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-012 บ้านนาควาย อ.เมือง จ.อุบลราชธานี 126
ผ-45 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-013 ล้านกุลา อ.ตระการพืชผล จ.อุบลราชธานี 127
ผ-46 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-018 วัดคำเขื่อนแก้ว อ.คำเขื่อนแก้ว จ.ยโสธร 128
ผ-47 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-015, K-040, K-041, K-042 และ K-064 สำหรับรูปที่ ผ-48 ถึงรูปที่ ผ-52 129
ผ-48 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-015 วัดบ้านดู่ อ.ธวัชบุรี จ.ร้อยเอ็ด 130
ผ-49 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-040 วัดสุทัศน์ อ.จตุรพักตร์พิมาน จ.ร้อยเอ็ด 131
ผ-50 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-041 บ้านนาศรีนวล อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม 132
ผ-51 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-042 วัดธาตุ อ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด 133
ผ-52 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-064 วัดพลับพลาชัย บ้านท่าหยอก อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด 134
ผ-53 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-056 และ K-073 สำหรับรูปที่ ผ-54 และ ผ-55 135
ผ-54 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-056 หอประชุมจัตุรัส อ.จัตุรัส จ.ชัยภูมิ 136

หน้า

ผ-55 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-073 บ้านท่าช้าง อ.คอนสวรรค์ จ.ชัยภูมิ 137
ผ-56 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-062, K-066, K-068, K-069, K-072, K-087, K-089 และ K-090 สำหรับรูปที่ ผ-57 ถึงรูปที่ ผ-64 138
ผ-57 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-062 วัดสระจันทราวาส อ.พล จ.ขอนแก่น 139
ผ-58 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-066 หอประชุม อ.บรบือ จ.มหาสารคาม 140
ผ-59 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-068 บ้านนาเชือก อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม 141
ผ-60 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-069 ประมาณ 350 เมตร ทิศตะวันออกเฉียงใต้ของ K-68 อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม 142
ผ-61 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-072 ตำบลโคกสง่า อ.พล จ.ขอนแก่น 143
ผ-62 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-087 บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม 144
ผ-63 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-089 บ้านนวย อ.บรบือ จ.มหาสารคาม 145
ผ-64 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-090 บ้านหนองหัวช้าง อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม 146
ประวัติผู้วิจัย 147

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1 คุณสมบัติของหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงที่ใช้ในการคำนวณ 20

2 ขนาดและรูปร่างของแบบจำลองโพรงในชั้นหินเกลือ 33

3 จำนวน Node และ Element ในแบบจำลอง 34

4 ข้อเสนอแนะในการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ 80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนที่ในบริเวณจังหวัดชัยภูมิแสดงตำแหน่งของหลุมสำรวจของหมู่บ้านต่าง ๆ ลำดับของชั้นหินของหลุมสำรวจเหล่านี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 11	8
2	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านวังกะอาม จ.ชัยภูมิ	9
3	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหัวบึ้ง จ.ชัยภูมิ	10
4	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดโพธิ์ตาล จ.ชัยภูมิ	11
5	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้าน โคกแฝก จ.ชัยภูมิ	12
6	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดหัวทะเล จ.ชัยภูมิ	13
7	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดสามัคคีธรรม จ.ชัยภูมิ	14
8	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโคกสว่าง จ.ชัยภูมิ	15
9	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านบึงทะเล จ.ชัยภูมิ	16
10	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโนนทองหลาง จ.ชัยภูมิ	17
11	ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหินตั้ง จ.ชัยภูมิ	18
12	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านวังกะอาม Model WK-1	25
13	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านวังกะอาม Model WK-2	26
14	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านวังกะอาม Model WK-3	27
15	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านวังกะอาม Model WK-4	28
16	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกแฝก Model KF-1	29
17	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกแฝก Model KF-2	30
18	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกสว่าง Model KS-1	31
19	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกสว่าง Model KS-2	32
20	ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-1	37
21	ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-2	38
22	ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-3	39
23	ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-4	40
24	ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-1	41
25	ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-2	42
26	ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-1	43

27 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-2 44

28 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-1 45

29 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-2 46

30 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-3 47

31 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-4 48

32 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-1 49

33 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-2 50

34 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-1 51

35 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-2 52

36 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-1 53

37 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-2 54

38 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-3 55

39 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-4 56

40 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-1 57

41 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-2 58

42 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-1 59

43 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-2 60

44 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK-1 62

45 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK-2 63

46 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK-3 64

47 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK-4 65

48 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KS-1 66

49 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KS-2 67

50 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KF-1 68

51 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KF-2 69

52 การทรุดตัวของผิวดินสำหรับแบบจำลอง WK-1, WK-3 และ WK-4 70

53 การทรุดตัวของผิวดินสำหรับแบบจำลอง WK, KS และ KF 71

54 การหดตัวในแนวดิ่งของโพรงของแบบจำลอง WK-1, WK-3 และ WK-4 72

55 การหดตัวในแนวดิ่งของโพรงของแบบจำลอง WK, KS และ KF 73

56 การหดตัวในแนวราบของโพรงของแบบจำลอง WK-1, WK-3 และ WK-4 74

57 การหดตัวในแนวราบของโพรงของแบบจำลอง KF, WK และ KS 75

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทำเหมืองเกลือแบบดั้งเดิม (ในระดับชาวบ้าน) เพื่อผลิตเกลือสินเธาว์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยได้ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และต่อการเกษตรกรรมอย่างมาก ปัญหาที่เห็นเด่นชัดอย่างหนึ่งก็คือการเกิดแผ่นดินทรุดในบริเวณรอบพื้นที่การทำเหมืองและผลที่ตามมาอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบการไหลและคุณสมบัติ (ความเค็ม) ของน้ำบาดาลที่อยู่เหนือชั้นหินเกลือ และในที่สุดสามารถทำให้เกิดปัญหาดินเค็มเกิดขึ้นได้

การทำเหมืองแบบดั้งเดิมเช่นนี้ คือการสูบเอาน้ำเกลือหรือน้ำบาดาลที่มีความเค็มที่ไหลอยู่บนชั้นหินเกลือขึ้นมายังผิวดินเพื่อตากให้แห้งให้เกลือตกผลึก หลังจากนั้นน้ำจืดที่เหลือก็จะสูบกลับลงไปในชั้นหินเช่นเดิม ผลึกของเกลือที่ได้ก็จะถูกเก็บรวบรวมและนำออกจำหน่าย ปัญหาหลักประการหนึ่งคือเราไม่สามารถคาดคะเนได้ว่าน้ำเค็มที่สูบขึ้นมานั้นได้ละลายชั้นเกลือส่วนใดออกไปบ้าง หรือได้ละลายชั้นหินเกลือในพื้นที่ใดออกไปบ้าง การทำเหมืองเช่นนี้สามารถทำให้เกิดโพรงขนาดใหญ่ในส่วนบนของชั้นหินเกลือ โพรงเหล่านี้จะอยู่ในระดับตื้นจากผิวดินและเป็นสาเหตุทำให้เกิดแผ่นดินทรุดเป็นแห่ง ๆ (Sinkhole) ตำแหน่งของโพรงเหล่านี้ก็ไม่สามารถคาดคะเนได้เนื่องจากความซับซ้อนของระบบการไหลของน้ำบาดาลที่อยู่บนชั้นหินเกลือ ด้วยเหตุผลดังกล่าวการทำเหมืองแบบไม่มีระบบ ไม่มีการวางแผน (แบบชาวบ้าน) จึงควรถูกยกเลิกเพื่อป้องกันผลกระทบที่รุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลกระทบนี้สามารถนำไปสู่ปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้

การทำเหมืองเกลือโดยวิธีละลายให้ได้มาตรฐานสากล ได้มีการทำขึ้นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยผู้ประกอบการที่มีต้นทุนสูง เช่น บริษัทไทยอาซาฮี ซึ่งทำเหมืองเกลือแบบละลายอยู่ที่ อ.พิมาย จ.นครราชสีมา การทำเหมืองเช่นนี้จะต้องมีการออกแบบและใช้ความรู้ทางวิชาการที่สูงมาก รวมไปถึงจะต้องมีการสำรวจทางด้านธรณีวิทยา และทางด้านธรณีฟิสิกส์ของชั้นหินที่วางตัวอยู่ข้างบนและข้างล่างของชั้นหินเกลือในพื้นที่ที่จะทำเหมือง การออกแบบของตัวโพรงในชั้นหินเกลือจะต้องทำด้วยความละเอียดและถูกต้อง ตัวแปรจะรวมไปถึงความลึกของหลังคาโพรง เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง ความสูงของโพรง ระยะห่างระหว่างโพรง ความหนาของชั้นหินเกลือข้างบนและข้างล่างของตัวโพรง ความดันของน้ำเกลือในโพรง ฯลฯ การคำนวณจะต้องรวมไปถึงการคาดคะเนของแผ่นดินทรุด (Subsidence) และการคาดคะเนของการหดตัวของโพรงในชั้นหินเกลือเนื่องมาจาก Creep deformation จะเห็นได้ว่าในระดับผู้ประกอบการขนาดเล็กโดยเฉพาะในระดับชาวบ้านซึ่งมีต้นทุนต่ำและความรู้น้อย จึงไม่สามารถที่จะออกแบบลักษณะทางวิศวกรรมธรณีของการทำเหมืองเกลือโดยวิธีละลายให้ได้มาตรฐานสากลได้

ปัญหาอีกประการหนึ่งของผู้ประกอบการ คือ ในประเทศไทยไม่มีข้อกำหนดและข้อแนะนำทางด้านวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการทำ Solution mining อย่างเพียงพอ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทรัพยากรธรณีก็ไม่มีข้อแนะนำในการออกแบบที่ถูกต้องและปลอดภัย (Design guidelines) เผยแพร่ให้แก่ผู้ประกอบการขนาดเล็ก

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ ประเมินความเหมาะสมทางวิศวกรรมธรณีของชั้นหินเกลือในหลายพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และทำการออกแบบลักษณะของโพรงในชั้นหินเกลือโดยการทำเหมืองแบบละลาย (Solution mining) แบบสากลโดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขเข้ามาช่วย ผลที่ได้รับจากข้อสรุปของงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์โดยตรงกับผู้ประกอบการทำเหมืองขนาดเล็ก ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในแต่ละพื้นที่ อย่างน้อยที่สุดผู้ประกอบการก็สามารถนำหลักเกณฑ์ที่เสนอในรายงานนี้ไปใช้เป็นแนวทางทางด้านวิชาการ (Technical guidelines) ในการวางแผนการทำเหมืองเกลือแบบละลาย ซึ่งจะส่งผลให้ผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนในการออกแบบ ลดปัญหาแผ่นดินทรุดและดินเค็ม และลดความสูญเสียของการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ (หินเกลือ) ในพื้นที่

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ขั้นต้นของโครงการวิจัย คือ การประเมินและวิเคราะห์ทางด้านกลศาสตร์และด้านอุทกวิทยาของชั้นหินเกลือรอบโพรงที่ถูกละลายไปในการทำเหมืองในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear time-dependent finite element) การวิเคราะห์จะถูกแสดงออกมาในรูปของพฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์และความซึมผ่านของหินเกลือที่อยู่รอบโพรงในปัจจุบันและคาดคะเนพฤติกรรมเหล่านี้ไปถึง 100 ปีข้างหน้า การออกแบบโพรงในหินเกลือจะพิจารณาถึงรูปทรงของโพรง (เส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูง และอัตราส่วนของความสูงกับเส้นผ่าศูนย์กลางที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของชั้นหิน) ความลึกของหลังคาโพรง ระยะห่างระหว่างโพรง ความดันภายใน และความหนาของเพดานชั้นหินเกลือ การวิเคราะห์จะมุ่งไปที่การให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวให้น้อยที่สุด และให้มีการทรุดตัวของพื้นดินและการเสื่อมสภาพของโพรงน้อยที่สุด ในขณะเดียวกันการออกแบบก็จะคำนึงถึงผลลัพธ์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการทำเหมือง ตัวอย่างเช่น ขนาดของโพรงจะต้องไม่เล็กเกินไป และไม่อยู่ลึกเกินกว่าที่จะสามารถขุดเจาะนำเกลือขึ้นมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

วัตถุประสงค์เฉพาะของงานวิจัยสามารถแยกเป็นหัวข้อดังนี้คือ

1) ออกแบบโพรงในหินเกลือเพื่อให้ง่ายต่อการก่อสร้างและมีเสถียรภาพสูงที่สุด
2) ประเมินเสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของเพดานโพรง ผนังด้านข้าง และพื้นของโพรงภายใต้สภาวะแวดล้อมในระยะยาว
3) คาดคะเนการทรุดตัวของผิวดินหลังจากได้ก่อสร้างโพรงขึ้น
4) คาดคะเนการหดตัวของโพรงในระยะยาว
5) ประเมินศักยภาพการเพิ่มขึ้นของความซึมผ่านได้ในชั้นหินเกลือรอบโพรง
6) ประเมินศักยภาพของผลกระทบต่อน้ำบาดาลที่อยู่ในชั้นหินที่วางตัวอยู่บนชั้นหินเกลือ
7) เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองต่าง ๆ เพื่อร่างข้อกำหนดหรือแนวทางในการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะมุ่งเฉพาะไปที่การประยุกต์ใช้ชั้นหินเกลือในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือเท่านั้น การวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของชั้นหินเกลือรอบ ๆ โพรง การศึกษาเสถียรภาพทั้งทางด้านกลศาสตร์และความซึมผ่านในระยะยาวของโพรงในชั้นหินเกลือจะถูกคำนวณไปถึง 100 ปีหลังจากที่โพรงได้ขุดขึ้นมา ทุก ๆ โพรงที่อยู่ในบริเวณที่ถูกกำหนดมีขนาดเท่ากันและรูปร่างเหมือนกันจะถูกสมมติว่าได้มีการขุดขึ้นมาพร้อมกัน (Instantaneous excavation) อุณหภูมิของชั้นหินเกลือจะถือว่ามีค่าคงที่จากวันแรกถึง 100 ปี (Isothermal condition) เนื่องจากการวิจัยมีจุดมุ่งหวังเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการออกแบบ ดังนั้นข้อสมมติฐานปลีกย่อยที่ตั้งขึ้นและใช้ในการคำนวณจะเป็นข้อสมมติฐานแบบแบบอนุรักษ์ (Conservative assumptions) เพื่อว่าการออกแบบโดยใช้ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะมีความปลอดภัยค่อนข้างสูง และเพื่อเพิ่มผลผลิต ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง และป้องกันการสูญเสีย ข้อสมมติฐานเหล่านี้จะถูกกำหนดในหัวข้อต่อไป เนื่องจากชั้นหินเกลือและหินที่เกี่ยวข้องในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีลักษณะแตกต่างกันมาก งานวิจัยนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ลักษณะของชั้นหินเกลือในพื้นที่นี้ได้ทั้งหมด เนื่องจากงบประมาณที่จำกัด ดังนั้นลักษณะของชั้นหินเกลือที่มีข้อมูลสมบูรณ์มากที่สุดจะถูกเลือกนำมาศึกษา อย่างไรก็ตามอย่างน้อยที่สุดลักษณะของชั้นหินเกลือใน 3 รูปแบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในขั้นแรกจะมีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินเกลือและชั้นหินที่อยู่บนและล่างของหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ลักษณะทางธรณีวิทยานี้จะมุ่งไปที่ความหนา ความลึก และความกว้างของชั้นหินเกลือในแต่ละบริเวณ ชั้นหินเกลือในหลายจังหวัดจะถูกนำมารวบรวมและประมวลผลเพื่อเปรียบเทียบลักษณะความคล้ายคลึงและแตกต่าง ชั้นหินเกลือเหล่านี้จะถูกจัดกลุ่มโดยใช้หลักเกณฑ์ของความคล้ายคลึงกันทางด้านวิศวกรรมธรณี และทางด้านการออกแบบโพรง

ในที่สุดบริเวณที่มีคุณลักษณะของชั้นหินเกลือที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเลือกนำมาใช้ในการออกแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ อย่างน้อยที่สุดลักษณะของชั้นหินเกลือ 3 แบบจะถูกเลือกมา

ในขั้นตอนที่ 2 ค่าคงที่ที่อยู่ในคอมพิวเตอร์โปรแกรมชื่อ GEO จะถูกกำหนดขึ้นในขั้นตอนนี้ คุณลักษณะทางด้านกลศาสตร์และฟิสิกส์ของหินเกลือและหินข้างเคียงจะถูกนำมาศึกษาเพื่อให้แน่ใจว่าค่าที่ได้รับจะเป็นค่าที่ปลอดภัย (Conservative estimate) เพื่อใช้ในการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 3 จะมีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และจะมีการกำหนดค่าทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องกับขนาดและรูปร่างของโพรงในชั้นหินเกลือ ค่าเหล่านี้จะรวมไปถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง ความสูงของโพรง ความลึกของหลังคาโพรง ระยะห่างระหว่างโพรง เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 จะมีการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมชื่อ GEO การคำนวณนี้จะมุ่งไปถึงการคาดคะเนลักษณะทางกลศาสตร์ และความซึมผ่านของชั้นหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรง นอกจากนั้นแล้วการคำนวณในการวิจัยนี้ยังจะมุ่งไปถึงการป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นในรูปของแผ่นดินทรุด (Surface subsidence) และในขณะเดียวกันก็จะคำนึงถึงคุณค่าทางเศรษฐกิจของการผลิตเกลือสินเธาว์ กล่าวคือ การออกแบบของโพรงแต่ละโพรงจะทำให้ใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดค่าใช้จ่าย การคาดคะเนผลกระทบและลักษณะทางกลศาสตร์และความซึมผ่านของชั้นหินเกลือนี้จะทำไปถึง 100 ปีข้างหน้าหลังจากที่เจาะโพรงในหินเกลือแล้ว

ในขั้นตอนที่ 5 และ 6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์จะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบในระหว่างแบบจำลอง และจะนำมาตรวจสอบโดยเทียบกับค่าของจริงถ้าเป็นไปได้ ความถูกต้องของการคำนวณก็จะนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะของโพรงในหินเกลือที่มีขนาดทางเรขาคณิตคล้ายคลึงกัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับโดยตรงจากงานวิจัยนี้ สามารถแจงเป็นข้อได้ดังนี้

1) เพิ่มผลผลิตของน้ำเกลือและเกลือสินเธาว์
2) เพิ่มเสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์และของชั้นหินเกลือรอบ ๆ ตัวโพรง
3) ลดต้นทุนและการสูญเสียที่อาจจะเกิดมาจากการพังทะลายของหลังคาโพรง ซึ่งการพังทะลายนี้สามารถก่อให้เกิดความเสียหายกับท่อน้ำเกลือและท่อน้ำจืดในขณะที่ผลิตน้ำเกลือ
4) ส่งเสริมการทำเหมืองเกลือให้ได้มาตรฐานสากลให้กับผู้ประกอบการขนาดเล็ก

ประโยชน์ที่จะได้รับในระยะยาว ซึ่งอาจจะไม่สามารถมองเห็นได้เด่นชัด คือ

1) ป้องกันแผ่นดินยุบและการเคลื่อนตัวของชั้นหินชั้นดินที่อยู่บนโพรงในชั้นหินเกลือ
2) ป้องกันการเสียหายของถนน ตึก สะพาน แม่น้ำ ป่าไม้ และสิ่งก่อสร้างอื่น ๆ ที่อยู่บนผิวดินข้างบนของโพรงหินเกลือ
3) อนุรักษ์คุณภาพและระดับของน้ำบาดาลในชั้นหินที่อยู่ข้างบนของหินเกลือเพื่อมิให้มีการเปลี่ยนแปลง
4) ป้องกันมิให้เกิดความเค็มในชั้นดินในบริเวณการทำเหมืองเกลือ
5) เพิ่มเสถียรภาพของโพรงเกลือในระยะยาวซึ่งต่อมาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเก็บกักวัตถุดิบอื่น ๆ นอกจากน้ำเกลือ เช่น น้ำมันดิบ ของเสียทางเคมี ข้าว ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ

หน่วยงานที่จะได้รับผลประโยชน์จากงานวิจัยนี้

1) หน่วยงานรัฐบาลที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทรัพยากรธรณี กรมโรงงาน และหน่วยงานที่เกี่ยวกับการรักษาสิ่งแวดล้อม หน่วยงานเหล่านี้จะสามารถนำผลของการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือมาใช้เพื่อเขียนกฎข้อบังคับ และข้อแนะนำทางวิชาการให้กับผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็กได้ดำเนินการ
2) ผู้ประกอบการที่เป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ของชั้นหินเกลือจะสามารถนำผลไปใช้เพื่อเป็นแนวทางการผลิตเกลือสินเธาว์ให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด
3) วิศวกรที่ปรึกษาสามารถนำผลไปเปรียบเทียบเพื่อให้มั่นใจว่าการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือของเขาได้มีการคำนวณมาอย่างถูกต้อง
4) บริษัทเงินทุนสามารถนำผลการวิจัยไปใช้เพื่อประกอบการพิจารณาเพื่อให้มั่นใจว่าผู้ประกอบการที่ขอกู้ยืมเงินได้ ออกแบบ วางแผนและดำเนินการทำเหมืองเกลือถูกต้องตามหลักวิชาการ และไม่มีผลกระทบรุนแรงหรือในระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อม
5) นักวิจัยอื่น ๆ จะสามารถนำผลที่ได้รับไปใช้เปรียบเทียบหรือเสนอโครงการต่อจากงานวิจัยนี้เพื่อที่จะได้ผลงานวิจัยที่ละเอียดขึ้นและแม่นยำมากขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในแต่ละพื้นที่ของการทำเหมืองเกลือแบบละลาย

บทที่ 1
ชั้นหินเกลือที่นำมาศึกษา

ผลของการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับชั้นหินเกลือจากหลุมสำรวจที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยแสดงให้เห็นว่าในพื้นที่นี้มีชั้นหินเกลือแพร่กระจายอยู่ทั่วไป ในแต่ละพื้นที่ความลึกและความหนาของชั้นหินเกลือและชั้นหินข้างเคียง (Associated rocks) จะมีคุณลักษณะต่างกัน ข้อมูลที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้รวมมาจากเอกสารอ้างอิงหลายฉบับ เช่น Suwanapal (1992), Japan International Cooperation Agency (1981), Yumuang (1995), Yumuang et al (1986), Suwanich and Ratanajarurak (1982), Japakasetr and Suwanich (1977) รายละเอียดเกี่ยวกับการเกิดและอายุของชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงเหล่านี้จะไม่นำมากล่าวถึงในรายงานนี้ ผู้อ่านที่สนใจสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงข้างต้น

ข้อมูลที่เกี่ยวกับลำดับและโครงสร้างของหินเกลือทั้งหมดนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมและจัดกลุ่มตามพื้นที่ในอำเภอและจังหวัดที่ใกล้เคียง และได้นำเสนอในภาคผนวกของรายงานนี้ เนื่องจากโครงการนี้สนใจเฉพาะชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงเท่านั้น การศึกษาและการจัดกลุ่มข้อมูลจึงใช้คุณลักษณะของชั้นหินเกลือเป็นเกณฑ์ ลำดับชั้นหินที่อยู่ต่ำกว่าชั้นหินเกลือจะไม่นำมากล่าวถึงในที่นี้ ในภาคผนวกลำดับชั้นหินจะแสดงในรูปของ Stratigraphic column โดยมีการระบุหมายเลขของหลุมเจาะสำรวจ และตำแหน่งที่แน่ชัด ซึ่งสามารถอ้างอิงได้ถึงต้นฉบับ (ปกรณ์ สุวานิช, 2521)

จาก Stratigraphic column ที่แสดงไว้ในภาคผนวกจะเห็นได้ชัดว่าความลึกและความหนาของชั้นเกลือจะต่างกันมากแม้จะอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้แล้วชั้นหินข้างเคียงที่แทรกอยู่ก็จะมีความหนาและลำดับที่ต่างกัน การที่จะออกแบบและวิเคราะห์เหมืองโพรงที่ได้จากการละลายในชั้นเกลือสำหรับพื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมดจึงเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบและการวิเคราะห์นี้จะต้องใช้ข้อมูลเฉพาะในพื้นที่เท่านั้น (Site-specific) ข้อมูลเฉพาะเหล่านี้คือ ความลึก ความหนา และลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียง

โครงการนี้มีงบประมาณที่จำกัดผู้วิจัยไม่สามารถออกแบบและวิเคราะห์โพรงในชั้นหินเกลือที่มีความหนาและความลึกในทุก ๆ ระดับได้ ดังนั้นพื้นที่ในจังหวัดชัยภูมิจึงถูกเลือกขึ้นมาในโครงการวิจัยนี้เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา อีกประการหนึ่งข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาของหินเกลือที่จังหวัดชัยภูมิก็จะมีค่อนข้างละเอียด ซึ่งเป็นผลพลอยได้มาจากการศึกษาและสำรวจของโครงการนานาชาติ 2 โครงการคือ ASEAN Soda Ash Project และ ASEAN Potash Project

รูปที่ 1 แสดงพื้นที่ของอำเภอชัยภูมิและตำแหน่งของหลุมสำรวจที่ให้ข้อมูลในงานวิจัยนี้ ลำดับของชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 11 ซึ่งประกอบด้วยหมู่บ้านต่าง ๆ ตามลำดับคือ บ้านวังกะอาม บ้านหัวบึง วัดโพธิ์ตาล บ้านโคกแฝก วัดหัวทะเล วัดสามัคคีธรรม บ้านโคกสว่าง บ้านบึงทะเล บ้านโนนทองหลาง และบ้านหินตั้ง

เพื่อความสะดวกในงานวิจัยนี้ชั้นหินเกลือที่จังหวัดชัยภูมิจะถูกจำแนกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ โดยใช้ความคล้ายคลึงของความหนา ความลึก และจำนวนชั้นเกลือเป็นเกณฑ์ ลำดับชั้นหินทั้ง 3 กลุ่มนี้จะใช้ชื่อแทนดังต่อไปนี้

กลุ่มบ้านวังกะอาม (WK) ลำดับชั้นหินในกลุ่มนี้จะเป็นตัวแทนของลำดับชั้นหินของพื้นที่ที่บ้านวังกะอาม บ้านหัวบึง และวัดโพธิ์ตาล

*กลุ่มบ้านโคกแฝก (KF) ลำดับชั้นหินในกลุ่มนี้จะเป็นตัวแทนของลำดับชั้นหินของ*พื้นที่ที่บ้านโคกแฝก วัดหัวทะเล และวัดสามัคคีธรรม

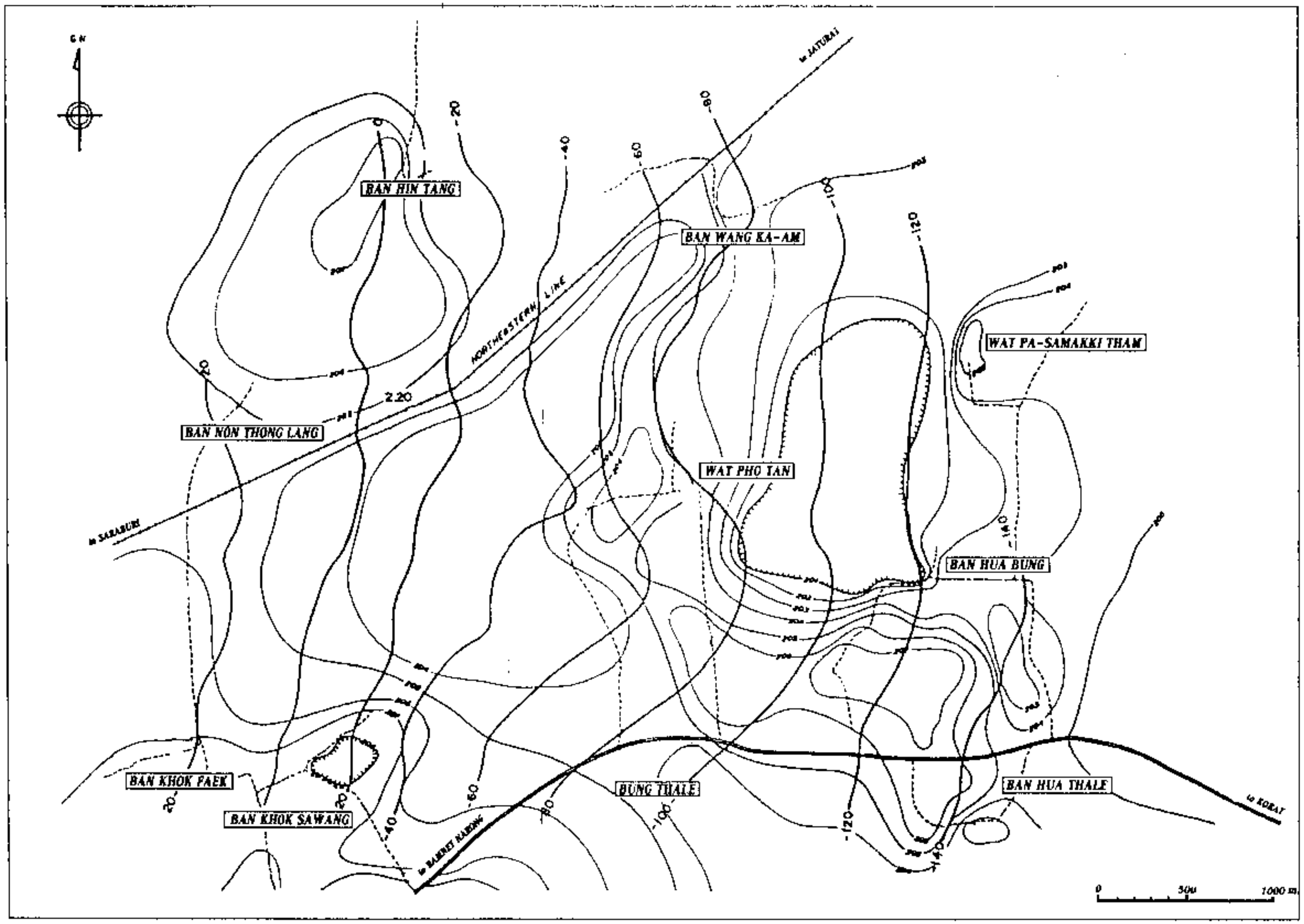
กลุ่มบ้านโคกสว่าง (KS) ลำดับชั้นหินในกลุ่มนี้จะเป็นตัวแทนของลำดับชั้นหินของพื้นที่ที่บ้านโคกสว่าง และบ้านบึงทะเล

ลำดับชั้นหินที่บ้านโนนทองหลางและบ้านหินตั้งจะไม่นำมาศึกษาในโครงการนี้ เนื่องจากชั้นหินเกลือใน 2 พื้นที่นี้อยู่ในระดับตื้นและมีความหนาไม่เพียงพอ การละลายโพรงในชั้นหินเกลือในพื้นที่นี้อาจทำให้เกิดแผ่นดินทรุด โพรงพังทลายและเกิดปัญหาดินเค็มตามมา

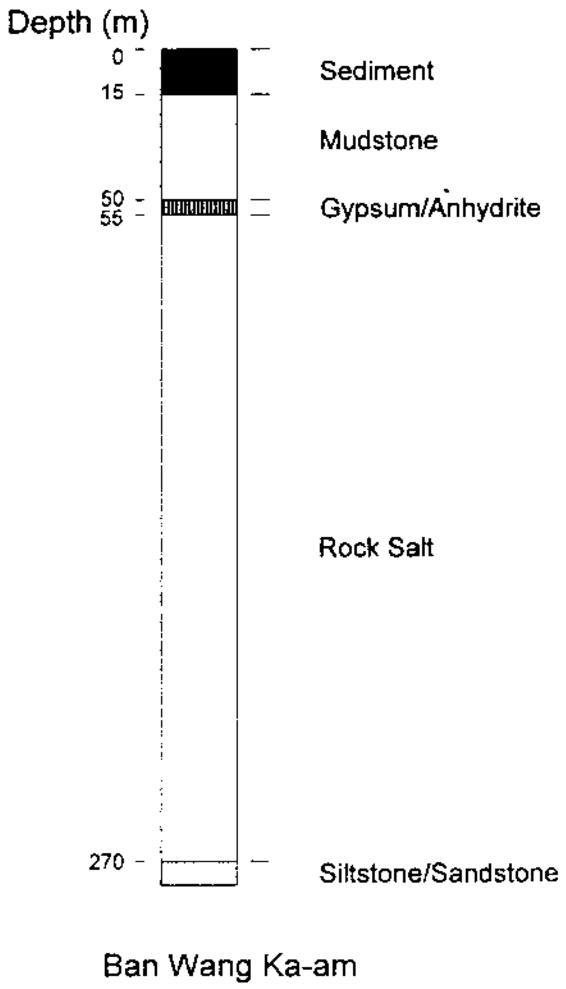
ชนิดของชั้นหินที่จังหวัดชัยภูมิในทุกพื้นที่ดังกล่าวข้างต้นสามารถแบ่งกลุ่มออกเป็น 5 ชั้นใหญ่ ๆ จากชั้นบนลงล่าง คือ

1. ชั้นดินตะกอน (Sediment) คือดินชั้นบนที่เป็นดินเหนียวสีเทาผสมดินร่วนมีเม็ดทรายละเอียดปนอยู่บ้างเล็กน้อย ชั้นรองลงมาเป็นดินทรายและดินเหนียวปนทราย ชั้นนี้มีเม็ดทรายสีเทาปนน้ำตาล สีชมพู และสีส้ม มีเศษหินตะกอนและหินทรายสีน้ำตาลแดงรวมอยู่ด้วย ส่วนในดินเหนียวส่วนใหญ่จะมีสีเทาแกมน้ำตาลปนเหลือง

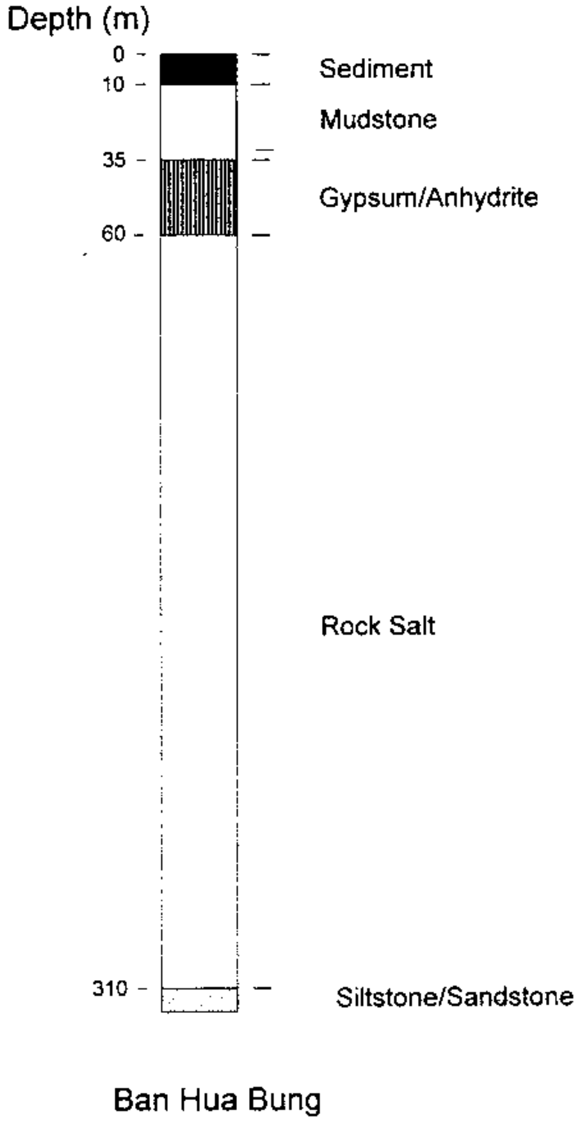
2. ชั้นหินดินดานและหินดินเหนียว (Mudstone และ Claystone) ชั้นนี้ส่วนมากเป็นสีน้ำตาลปนแดง ประกอบด้วยดินเหนียวสีเทา และหินดินเหนียวกรวดเหลี่ยมผสมกับ Anhydrite ดินเหนียวสีเทาจะพบกระจายอยู่ทั่วไป บางแห่งมีมุมเอียงประมาณ 10 องศา หินตะกอนกรวดเหลี่ยมจะมีสีน้ำตาลปนแดง ส่วนที่เป็นกรวดเหลี่ยมจะมีความอ่อนกว่า บางแห่งมีดินเหนียวสีเขียวปนเทาสลับกับชั้น Anhydrite บางแห่งพบ Halite และ Carnallite เป็นสายแร่ขนาดเล็กแทรกอยู่



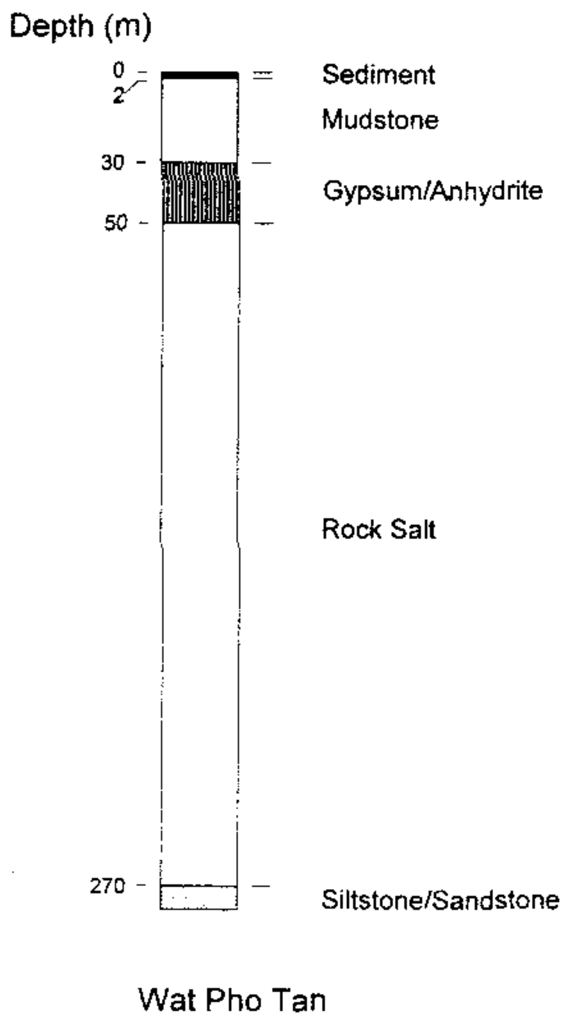
รูปที่ 1 แผนที่ในบริเวณจังหวัดชัยภูมิแสดงตำแหน่งของหลุมสำรวจของหมู่บ้านต่าง ๆ ลำดับของชั้นหินของหลุมสำรวจเหล่านี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 11



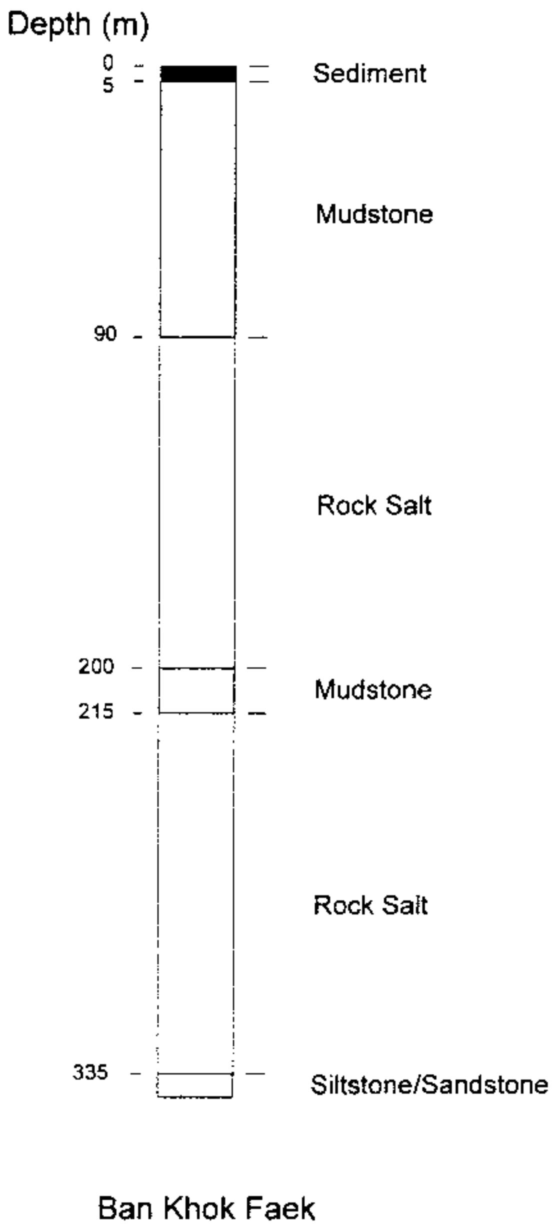
รูปที่ 2 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านวังกะอาม จ.ชัยภูมิ



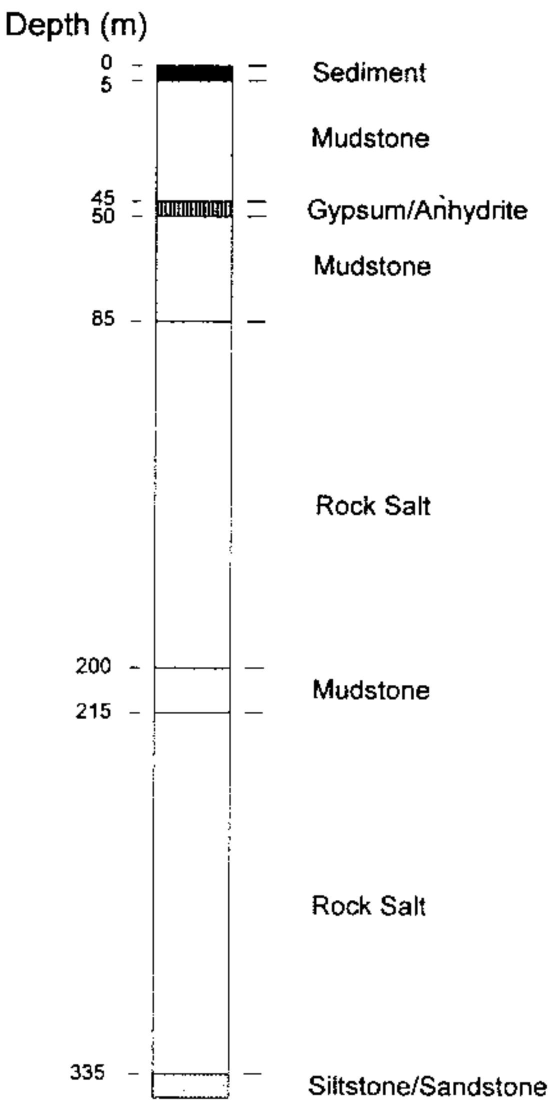
รูปที่ 3 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหัวบึง จ.ชัยภูมิ



รูปที่ 4 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดโพธิ์ตาล จ.ชัยภูมิ

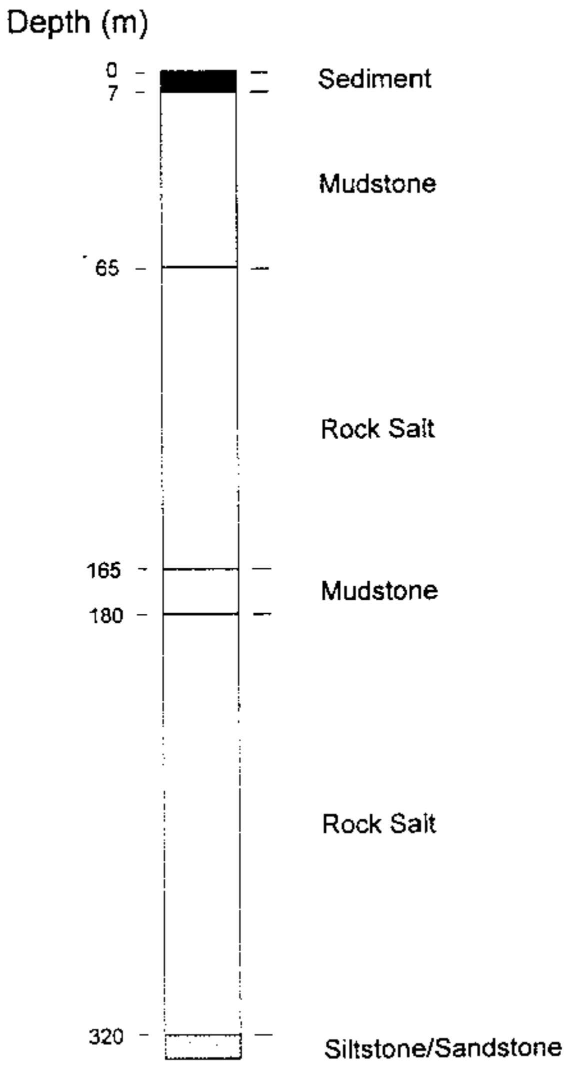


รูปที่ 5 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโคกแฝก จ.ชัยภูมิ



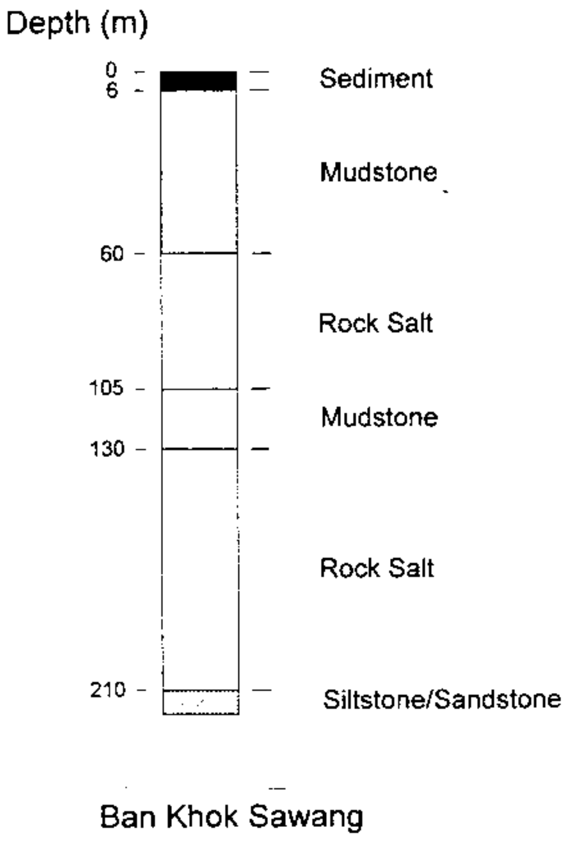
Wat Hua Thale

รูปที่ 6 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดหัวทะเล จ.ชัยภูมิ

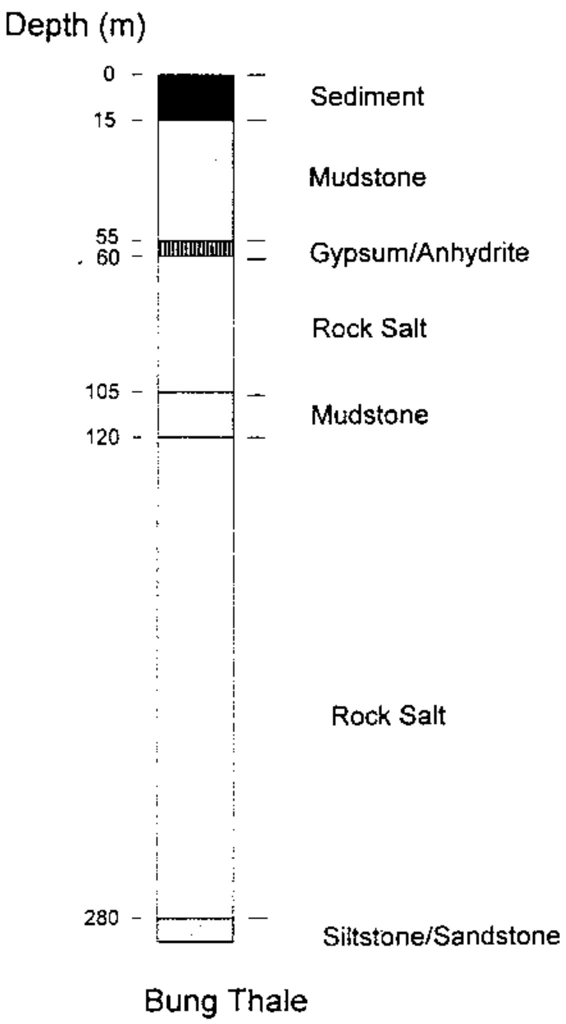


Wat Pa Samakki Tham

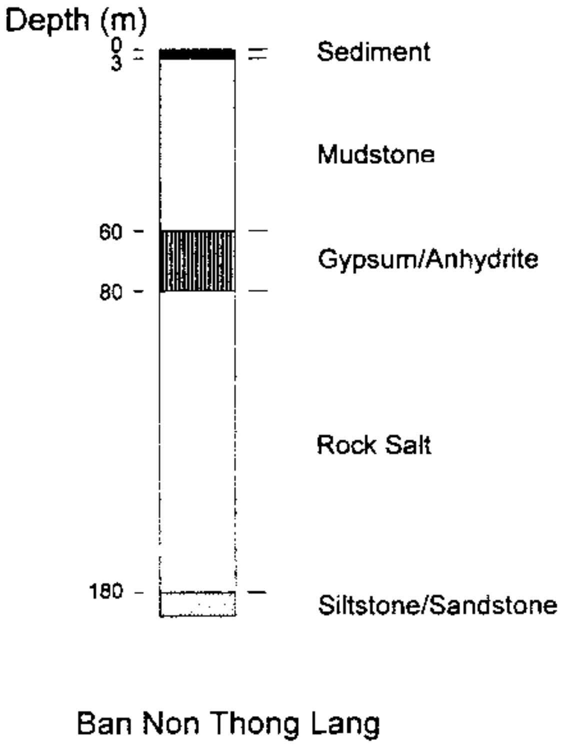
รูปที่ 7 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดสามัคคีธรรม จ.ชัยภูมิ



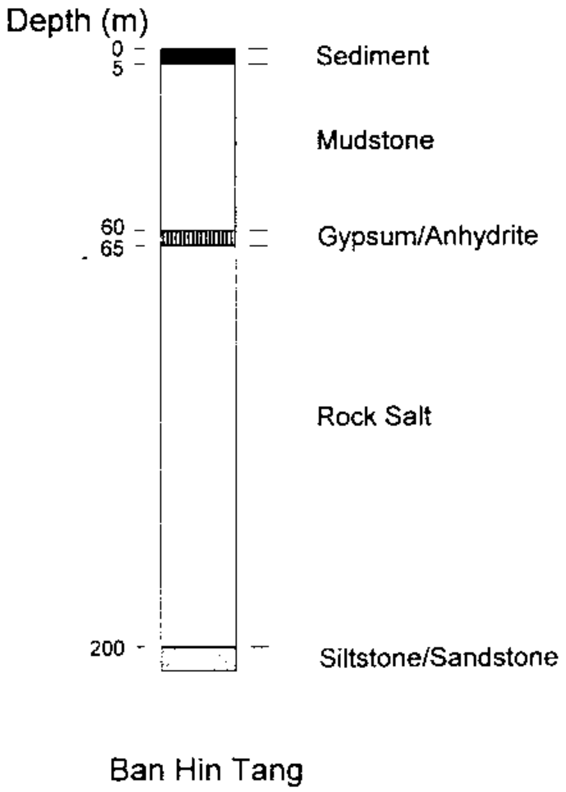
รูปที่ 8 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโคกสว่าง จ.ชัยภูมิ



รูปที่ 9 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านบึงทะเล จ.ชัยภูมิ



รูปที่ 10 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโนนทองหลาง จ.ชัยภูมิ



รูปที่ 11 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหินตั้ง จ.ชัยภูมิ

3. <u>ชั้น Anhydrite และ Gypsum</u> จะมีสีเทาปนขาวขุ่น มีลักษณะเนื้อแน่น บางแห่งพบชั้นบาง ๆ ของ Halite ในชั้น Gypsum ส่วนใหญ่ไม่มีสี บางแห่งมีผลึกแก้วสีน้ำตาลปนดำ

4. <u>ชั้นหินเกลือ</u> (Salt) โดยมากเป็นแร่ Halite ที่ไม่มีสี บางแห่งพบชั้น Halite ที่มีสีน้ำตาลอ่อนโดยเฉพาะบริเวณส่วนกลางถึงส่วนล่างของชั้นหินเกลือ บางแห่งจะพบผลึกของ Halite ที่มีสีน้ำตาลอ่อนกระจายอยู่ทั่วไป

5. <u>หินทรายและหินทรายแป้ง</u> (Sandstone and Siltstone) จะมีสีเทาเนื้อแน่นและมีจุดสีน้ำตาลปนแดง ส่วนในชั้นหินทรายจะมีเนื้อแน่นบางครั้งมีหินดินดานสีน้ำตาลปนแดงแทรกอยู่

ในอดีตชั้นหินเกลือที่จังหวัดชัยภูมิได้มีการศึกษาอย่างละเอียดทั้งทางด้านธรณีวิทยา ธรณีวิทยาโครงสร้าง ธรณีวิทยาเคมี และทางด้านกลศาสตร์ แต่ข้อมูลที่ได้เผยแพร่สู่ประชาชนในรูปของสิ่งตีพิมพ์จะเป็นข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาโครงสร้าง และธรณีวิทยาเคมีเท่านั้น ข้อมูลทางด้านกลศาสตร์ไม่เคยเผยแพร่ต่อประชาชน

ส่วนข้อมูลทางด้านความซึมผ่าน (Permeability) ของหินเกลือในประเทศไทยไม่เคยมีการศึกษาทั้งในห้องทดลองและภาคสนาม อาจเป็นเพราะว่าการศึกษาจะต้องใช้ต้นทุนและความรู้ทางวิชาการสูง

ในโครงการนี้ผู้วิจัยได้กำหนดคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ของหินทั้ง 5 ชนิดดังกล่าวข้างต้น ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 คุณสมบัติเหล่านี้ได้มาจากชั้นหินเกลือและหินที่เกี่ยวข้องในประเทศสหรัฐอเมริกา คุณสมบัตินี้ได้ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อให้มีความปลอดภัยในการออกแบบและวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ค่า Shear modulus (G) และค่า Bulk modulus (K) ได้ถูกเลือกเป็น 0.5×10^6 psi และ 2.5×10^6 psi ตามลำดับ ค่าเหล่านี้จะค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับหินเกลือทั่ว ๆ ไปในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา และเยอรมันนี ซึ่งจะมีค่าต่ำสุดของค่า G = 1.0×10^6 psi และค่า K = 5×10^6 psi เป็นต้น (Hansen et al., 1984) ในทำนองเดียวกันค่า Creep properties และคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของหินเกลือและหินข้างเคียงก็จะถูกเลือกขึ้นเพื่อให้เป็นค่าที่ปลอดภัยในการออกแบบและการวิเคราะห์เช่นกัน

ตารางที่ 1 : คุณสมบัติของหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงที่ใช้ในการคำนวณ

คุณสมบัติ	หน่วย	Sediment	Mudstone	Sandstone	Salt	Anhydrite
Shear Modulus	10^6 psi	0.005	0.050	2.0	0.5	0.5
Retarded Shear Modulus ($\tau_o < K_o$)	10^6 psi	0.010	0.050	2.0	0.1	2.0
Retarded Shear Modulus ($\tau_o > K_o$)	10^6 psi	0.010	0.050	2.0	0.1	2.0
Elastoviscosity ($\tau_o < K_o$)	10^5 psi.day	0.001	0.005	0.5	0.53	0.5
Elastoviscosity ($\tau_o > K_o$)	10^5 psi.day	0.001	0.005	0.5	1.0	1.0
Plastoviscosity	10^6 psi.day	0.4	0.4	2.0	4.00	4.0
Ultimate Bulk Modulus	10^6 psi	0.010	0.250	12.0	2.5	12.0
Retarded Bulk Modulus	10^6 psi	0.010	0.250	12.0	2.0	12.0
Hydrostatic Elastoviscosity	10^5 psi.day	0.0003	0.002	12.0	7.0	12.0
Unconfined Octah. Shear Strength	psi	10	50	100	50	100
Ultimate Octah. Shear Strength	Psi	100	500	1000	500	1000
Yield Surface Coefficient	10^{-3} psi	10	5.0	0.5	1.5	1.5
Critical Strain of Failure	-	0.010	0.010	0.002	0.010	0.01
Density Gradient	psi/ft	-1.12	-1.12	-1.12	-0.944	-1.20
Power Coeff. of Plastoviscosity	-	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
Deterioration Coeff. of Shear	-	4.0	4.0	2.0	2.0	2.0
Transition Pressure	psi	*	*	*	6000	*
Volume Expansion Coefficient	-	*	*	*	0.05	*
Shear Expansion Coefficient	-	*	*	*	0.20	*
Confinement Coefficient	-	*	*	*	10.0	*
Permeability Constant	microdarcy	*	*	*	2×10^{14}	*
Stress Coefficient	-	*	*	*	3.9	*
Minimum Stress Coefficient	-	*	*	*	40.0	*

* ไม่นำมาพิจารณาในการวิจัยนี้

บทที่ 2
ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา

ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์นี้จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาของหินเกลือและการเปลี่ยนความซึมผ่านตามกาลเวลาของหินเกลือ ทฤษฎีนี้ได้ถูกเสนอขึ้นโดย Fuenkajorn & Serata (1992) รายละเอียดของทฤษฎีนี้จะไม่นำมาเสนอในที่นี้ ผู้อ่านที่สนใจสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง ในรายงานนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีนี้และคุณลักษณะของคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่นำมาใช้ อย่างคร่าว ๆ เท่านั้น

หลักเกณฑ์ของ von Mises criterion ได้นำมาใช้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนรูปของหินเกลือ (Creep Shear Deformation) ในแนวเฉือน จากหลักเกณฑ์นี้อัตราการเปลี่ยนความต้านแรงเฉือน (Octahedral shear strength K_o) สามารถแสดงได้โดยสมการข้างล่างนี้

$$dK_o/d\sigma_m = \alpha(K^B - K_o) \qquad (1)$$

α = yield surface coefficient

K^B = ultimate octahedral shear strength

K_o = octahedral shear strength

ในการคำนวณค่า K_o ผู้เสนอทฤษฎีนี้ได้ใช้การแปรรูปของหินเกลือประกอบกับแรงดันและความเค้นในชั้นหินเป็นเกณฑ์ ดังนั้นค่า K_o สามารถแสดงได้โดยสมการข้างล่างนี้

$$K_o = \exp[-C(\gamma_o-\gamma_c)/\gamma_c]\ \{[K^A = (K^B-K^A)(1-\exp(-\alpha\sigma_m))] - K^B\sigma_m/P\} - K^B\sigma_m/P \qquad (2)$$

γ_o, γ_c คือ ค่า Octahedral shear strain และ Critical octahedral shear strain ตามลำดับ

σ_m คือ ค่าเฉลี่ยของความกดดันในหินเกลือที่จุด ๆ หนึ่ง

P คือ ค่าความกดดันที่หินเกลือเปลี่ยนจากคุณสมบัติเปราะเป็นคุณสมบัติแบบเหนียว

C คือ ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของหินเกลือ

ในขณะที่หินเกลือได้เปลี่ยนรูปเกินขีดจำกัด (Critical octahedral shear strain) หินเกลือนี้จะมีปริมาตรมากขึ้นเนื่องจากเนื้อในของหินเกลือจะมีการแตกร้าว การแตกร้าวนี้ตามหลักวิชาการก็เสมือนหนึ่งเป็นความพรุนของเนื้อหินที่เพิ่มขึ้น (Porosity increase) นั่นเอง การคำนวณปริมาตรที่เพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งเรียกว่า Inelastic dilation การคำนวณนี้จะใช้สมการดังแสดงให้เห็นข้างล่างนี้

$$\varepsilon_{IN} = F\{\exp[C(\gamma_o - \gamma_c) / \gamma_c] - 1\} \exp[-H\sigma_m/(P - \sigma_m)];\ \gamma_o > \gamma_c \text{ and } \sigma_m < P \qquad (3)$$

ε_{IN} คือ ค่า Inelastic dilation และให้มีค่าเท่ากับความพรุนที่เพิ่มขึ้น

H คือ ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของหินเกลือ

สมการที่ (3) นี้จะแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความพรุนของหินเกลือจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อหินเกลือถูกเปลี่ยนรูปเกินขีดจำกัดอันหนึ่ง ($\gamma_o > \gamma_c$) และต่อเมื่อความกดดันในหินจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่แบ่งระหว่างความเปราะและความเหนียวของหินเกลือ ($\sigma_m < P$) ค่าคงที่นี้ (P) จะเรียกได้ว่าเป็น Brittle-to-Ductile Transition Pressure จากความพรุนที่คำนวณได้นี้เราสามารถคำนวณหาความซึมผ่าน (Permeability) ของชั้นหินเกลือที่อยู่ภายใต้แรงกด (Stresses) และการเปลี่ยนรูป (Deformation) ที่ต่างกัน ความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K = A(\bar{\sigma}_3^{*})^{\lambda} (\varepsilon_{IN})^{(1-\exp(-\eta\sigma_3^{*}))} \qquad (4)$$

σ_3^{*} คือ ค่า Minimum Principal Stress ที่ตั้งฉากกับรอยร้าว (Micro-crack)

A, λ คือ ค่าคงที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางด้านความซึมผ่านของหินเกลือ

สมการหลักทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นได้นำมาใส่ไว้ในคอมพิวเตอร์โปรแกรม GEO เพื่อคำนวณหาพฤติกรรมทางกลศาสตร์และความซึมผ่านของหินเกลือที่ใดก็ได้ โปรแกรมนี้ได้ถูกเขียนขึ้นมาโดยใช้วิธี Finite Element Method ซึ่งจะใช้วิธี Weighted residual เพื่อแก้สมการ Differential equations และจะคำนวณพฤติกรรมของวัตถุโดยใช้การเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาเป็นหลัก (Explicit time domain integraton) รายละเอียดของโปรแกรมนี้และของทฤษฎีเบื้องต้นสามารถศึกษาต่อได้จาก Serata and Fuenkajorn (1992), Fuenkajorn and Serata (1992, 1994) และ Stormont and Fuenkajorn (1994)

ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโพรงในหินเกลือหลายแห่งในสหรัฐอเมริกา และแคนาดา โพรงเหล่านี้ได้รวมไปถึงโพรงที่ใช้เก็บของเสีย ก๊าซธรรมชาติ อากาศอัด และใช้เก็บผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมอื่น ๆ ทฤษฎีนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่ามีความเชื่อถือได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมาคาดคะเนพฤติกรรมทางกลศาสตร์และความซึมผ่านของหินเกลือในอนาคตอันยาวนาน ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่แสดงให้เห็นในสมการข้างบนก็สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องทดลองและในภาคสนาม

บทที่ 3
การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

3.1 ลักษณะต่าง ๆ ของแบบจำลอง

โปรแกรม AutoCad ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างรูปร่างทางเรขาคณิต (Finite element mesh) ของแบบจำลองของโพรงในชั้นหินเกลือในพื้นที่ที่ใช้เป็นตัวแทน (Representative model) คือ บ้านวังกะอาม บ้านโคกสว่าง และบ้านโคกแฝก แบบจำลองนี้จะทำใน 2 มิติ โดยใช้จุดศูนย์กลางของโพรงเป็นแกนเพื่อที่จะแสดงภาพตัดขวางในแนวดิ่งตั้งแต่ชั้นผิวดินลงไปถึงชั้นหินที่อยู่ใต้ชั้นหินเกลือ การศึกษานี้ได้สร้าง 8 แบบจำลอง ตารางที่ 2 จะสรุปคุณลักษณะของแบบจำลองทั้ง 8 แบบ ซึ่งจะมีความลึก เส้นผ่าศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างโพรงที่ต่าง ๆ กัน แบบจำลองที่บ้านโคกสว่างจะใช้ตัวย่อ KS แบบจำลองที่บ้านวังกะอามจะใช้ตัวอยู่ WK แบบจำลองที่บ้านโคกแฝกจะใช้ตัวย่อ KF นอกจากนั้นแล้วข้อมูลที่ได้จากเหมืองเกลือที่อำเภอพิมายก็ได้นำมาเปรียบเทียบ การเปรียบเทียบนี้ก็จะรวมไปถึงผลผลิตของเกลือสินเธาว์ที่ได้ซึ่งจะเปรียบเทียบในรูปของ Extraction ratio คือปริมาณของเกลือในหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อตารางกิโลเมตรของพื้นที่ที่ทำเหมือง

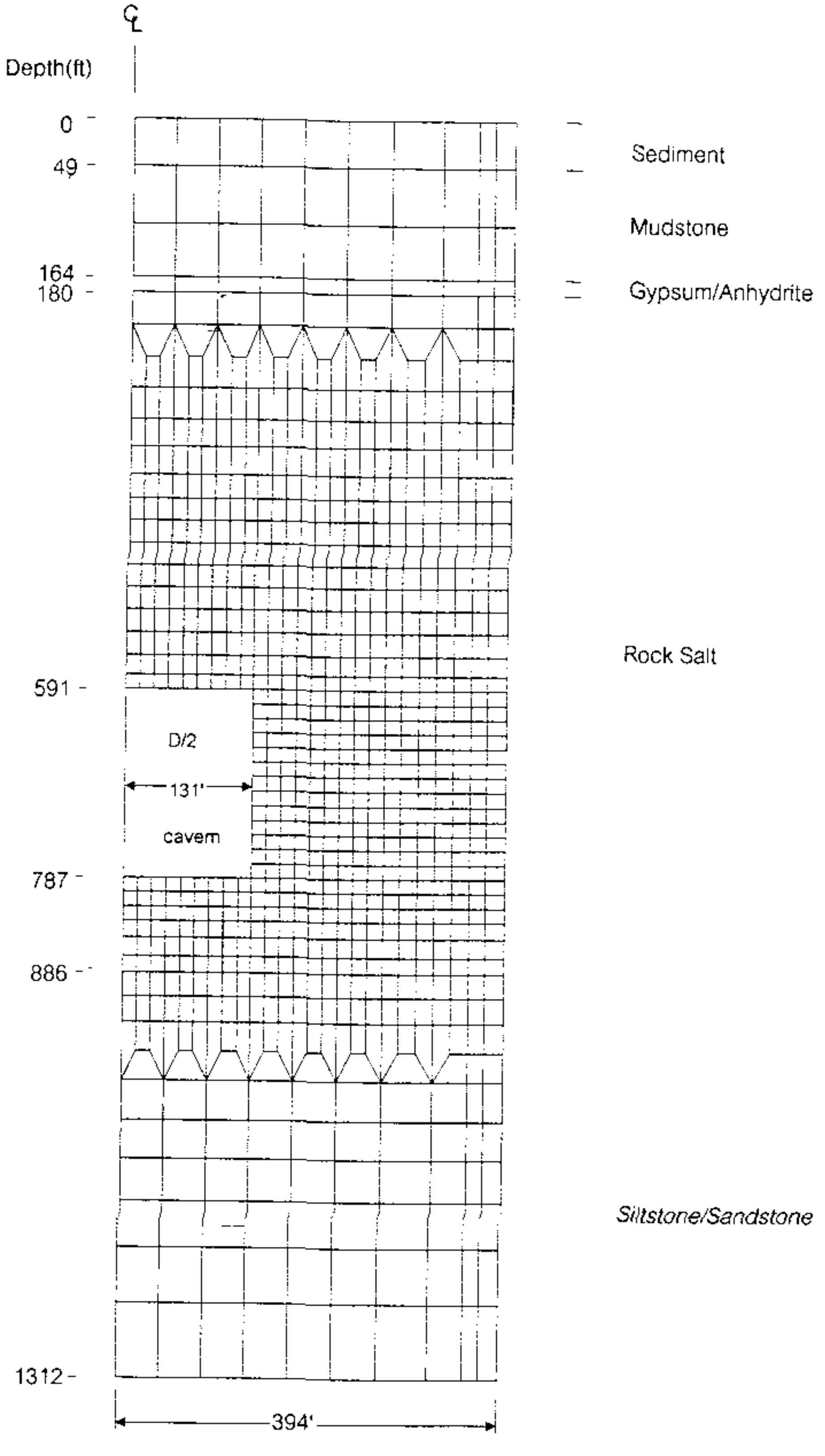
ในการศึกษานี้แบบจำลองได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อพิจารณาขนาดและความลึกของโพรงที่มีผลทางด้านกลศาสตร์ของหินเกลือ ผลที่ได้รับจากการคำนวณจากแบบจำลองนี้จะบ่งบอกถึงขนาดและระยะห่างของโพรงที่เหมาะสมที่สุด คือ *มีเสถียรภาพมากที่สุด มีโอกาสรั่วไหลน้อยที่สุด มีการ*ทรุดตัวของผิวดินน้อยที่สุด และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องน้อยที่สุด การตัดสินว่าโพรงขนาดใดและความลึกเท่าใดจะเหมาะสมที่สุดนี้จะใช้วิธี Interpolation จากผลลัพธ์ของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

จากลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินเกลือในพื้นที่ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ในแต่ละแบบจำลองผู้วิจัยได้กำหนดความลึกของหลังคาของโพรงจากผิวดินโดยอาศัยประสบการณ์และหลักเกณฑ์ที่ว่า หลังคาของโพรง (Salt roof) จะต้องมีความหนาเพียงพอที่จะค้ำยันตัวโพรงและชั้นหินหรือดินที่อยู่ข้างบนและในขณะเดียวกันก็จะไม่ลึกเกินไปจนทำให้ปริมาตรของโพรงหรือความจุน้อยเกินไป พื้นของโพรงในหินเกลือ (Salt floor) จะต้องหนาพอเพื่อป้องกันมิให้ของเสียไหลออกไปและจะต้องไม่หนาเกินไปจนทำให้ความจุของโพรงลดน้อยลงเกินไป พื้นของโพรงที่มีความหนาประมาณ 30 เมตร ได้ถูกเลือกขึ้นโดยอาศัยประสบการณ์ของผู้วิจัย

การคำนวณทางคอมพิวเตอร์จะตั้งสมมติฐานว่า โพรงในหินเกลือที่ถูกออกแบบจะมีหลายโพรง โดยมีความลึกและขนาดเท่ากันของแต่ละแบบจำลอง การเรียงตัวในแนวราบของโพรงจะเป็นแบบ Square grid โดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง (Spacing S) เท่ากันหมด Square grid นี้จะเป็นแบบ infinite array อยู่ในบริเวณพื้นที่แนวราบในชั้นหินเกลือ การคำนวณจะสมมติว่าโพรงจะติดกันในแนวที่ตั้งฉากกับรูปแบบจำลอง (Plane strain assumption) ข้อสมมติฐานนี้จะปลอดภัยในการนำมาใช้ในกระบวนการออกแบบและในเชิงของพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหินเกลือและปลอดภัยในเชิงของการทรุดตัวของผิวดิน

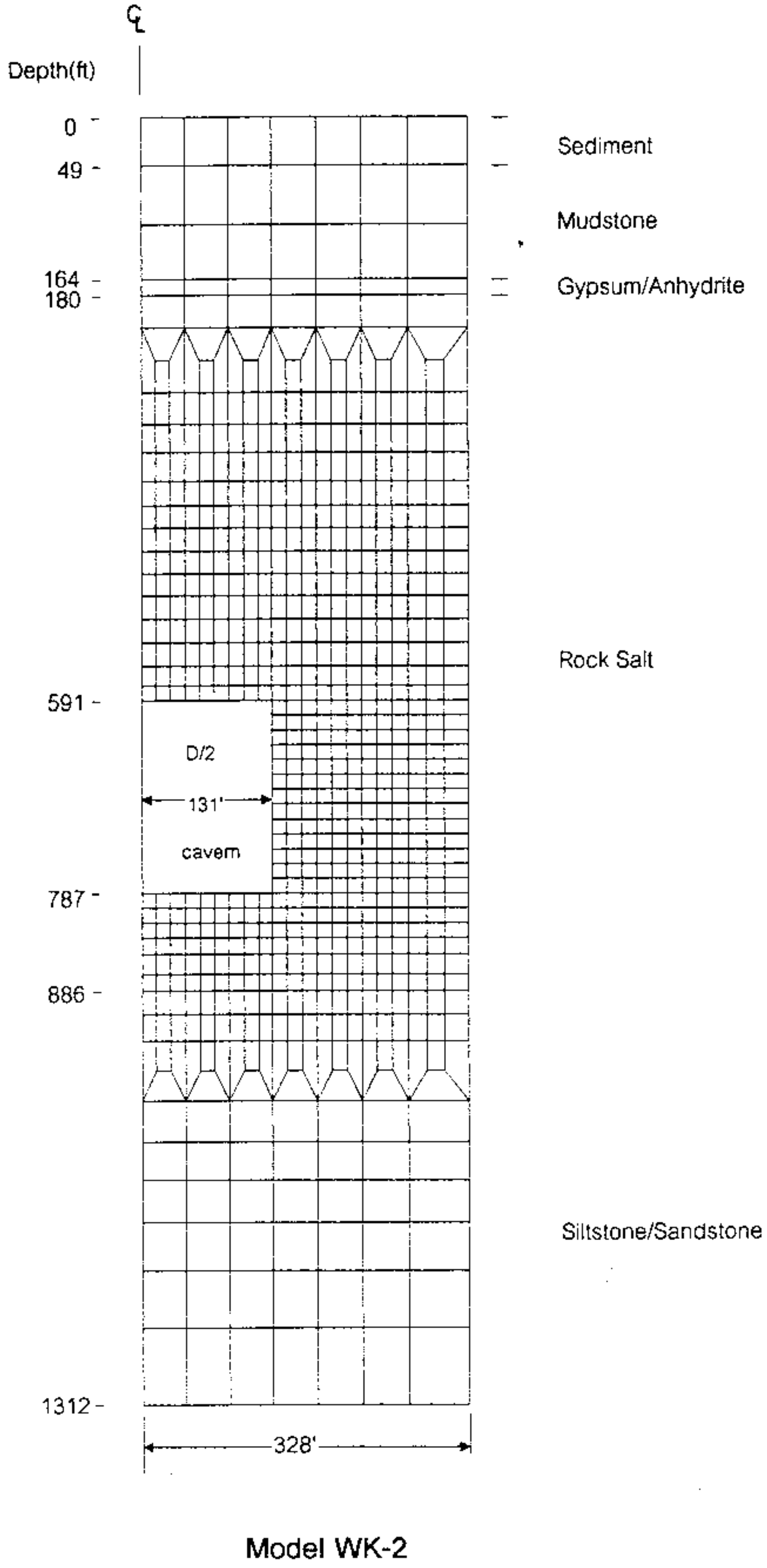
3.2 การออกแบบ Mesh

แบบจำลองทั้ง 8 แบบที่กล่าวมาจะสร้างมาจากภาพตัดขวางในแนวดิ่ง โดยมีแกนของทรงกระบอกเป็นขอบเขตทางด้านซ้ายมือ และมีระยะห่างครึ่งหนึ่งระหว่างตัวโพรงเป็นขอบเขตทางด้านขวามือ ขอบเขตทั้งสองด้านนี้จะเปรียบเสมือนเป็น Symmetry plane ภาพตัดขวางนี้จะถูกจำลองตั้งแต่ผิวดินลงไปถึงความลึกต่ำกว่าชั้นหินเกลือ รูปที่ 12 ถึงรูปที่ 19 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองทั้ง 8 แบบที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูล ข้อกำหนด และข้อสมมติฐานที่กล่าวมาแล้ว ช่อง (element) ในโพรงจะไม่ได้ถูกเขียนลงเนื่องจากความต้องการที่จะแสดงขอบเขตของโพรงใน Mesh จะเห็นได้ว่าการออกแบบ Mesh จะใช้ช่อง (element) ที่มีขนาดเล็กในบริเวณที่ใกล้กับตัวโพรง เนื่องจากในบริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นและความเครียดสูง (high stress and strain gradient) ส่วนในบริเวณที่ไกลจากตัวโพรงจะใช้ช่อง (element) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลง stress และ strain ต่ำ รูปที่ 12 ถึงรูปที่ 19 นี้ยังแสดงให้เห็นถึงความหนาของชั้นหินแต่ละชั้นในพื้นที่ที่นำมาศึกษา ตารางที่ 2 สรุปรูปร่างทางเรขาคณิตของแบบจำลองต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับโพรงของจริงที่อำเภอพิมาย ปริมาณน้ำเกลือที่ผลิตได้ต่อหนึ่งตารางกิโลเมตรก็ได้นำมาเปรียบเทียบด้วย เนื่องจากจุดประสงค์อันหนึ่งของงานวิจัยนี้คือการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้น ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการคำนวณจะพยายามให้เป็นค่าคงที่ หรือให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ยกตัวอย่างเช่น จำนวนและขนาดของ Mesh เป็นต้น ตารางที่ 3 จะสรุปให้เห็นถึงจำนวนและขนาดของ element และ node ของ mesh ที่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับ 8 แบบจำลองนี้

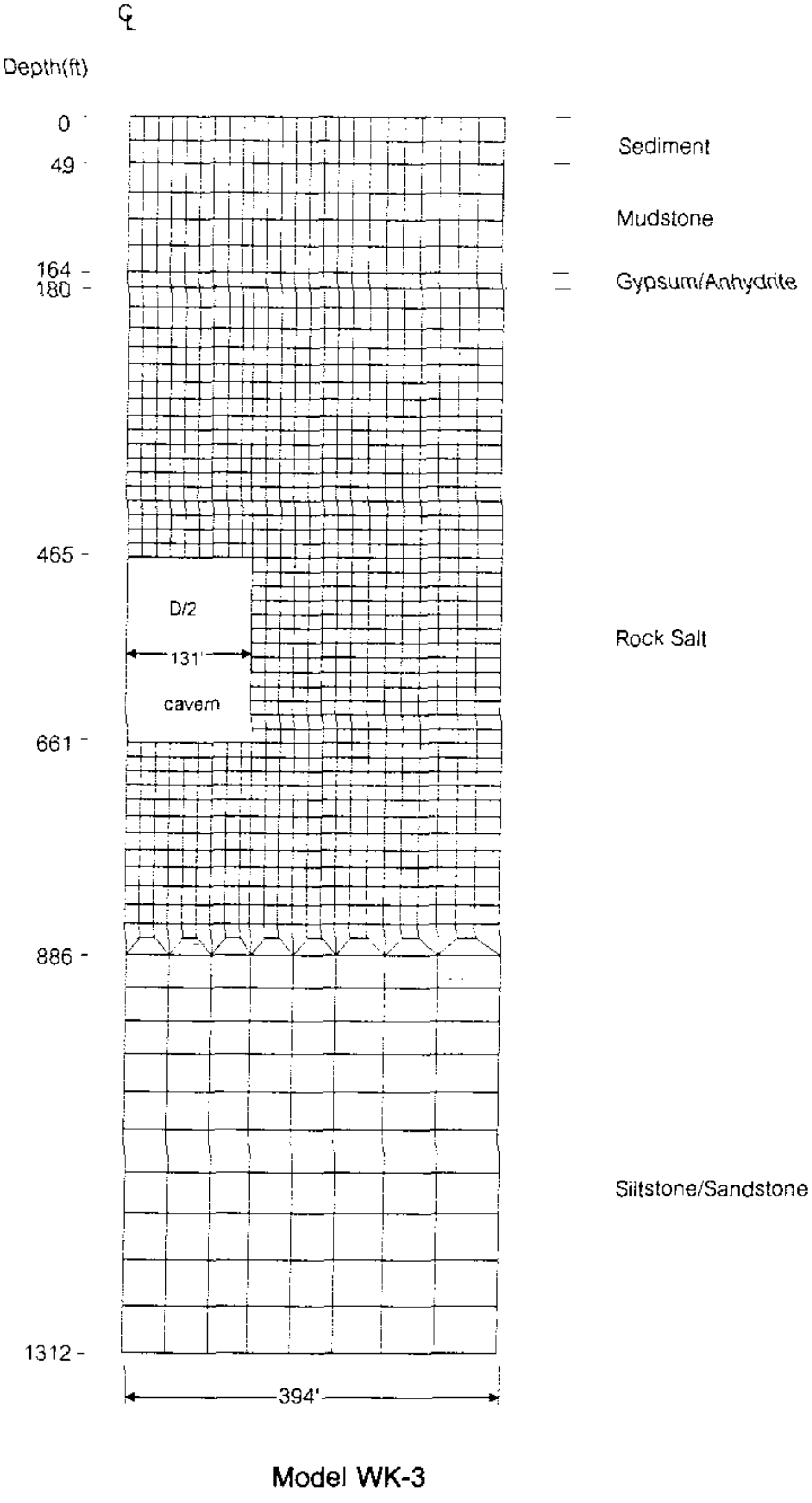


Model WK-1

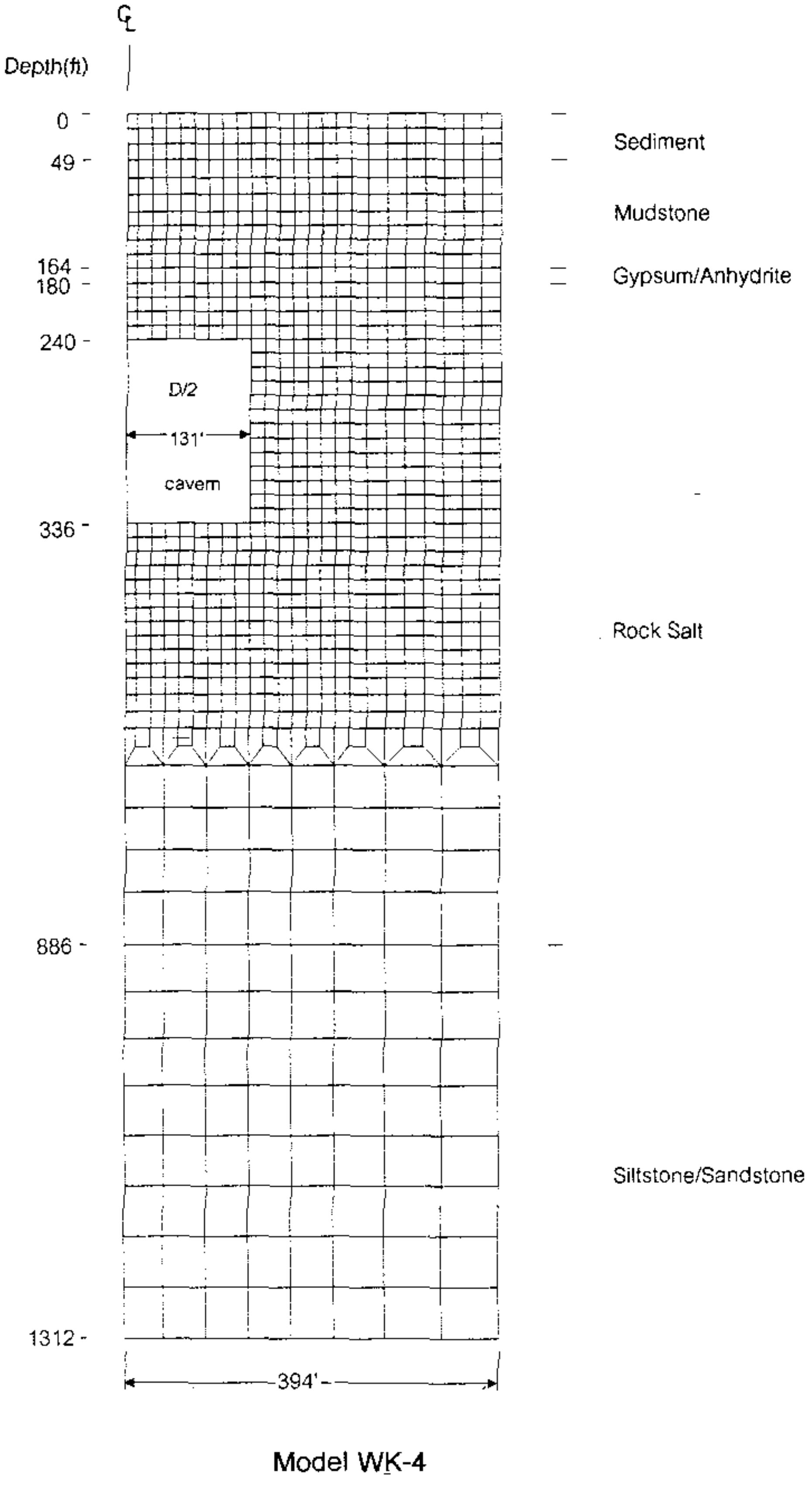
รูปที่ 12 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านวังกะอาม Model WK-1



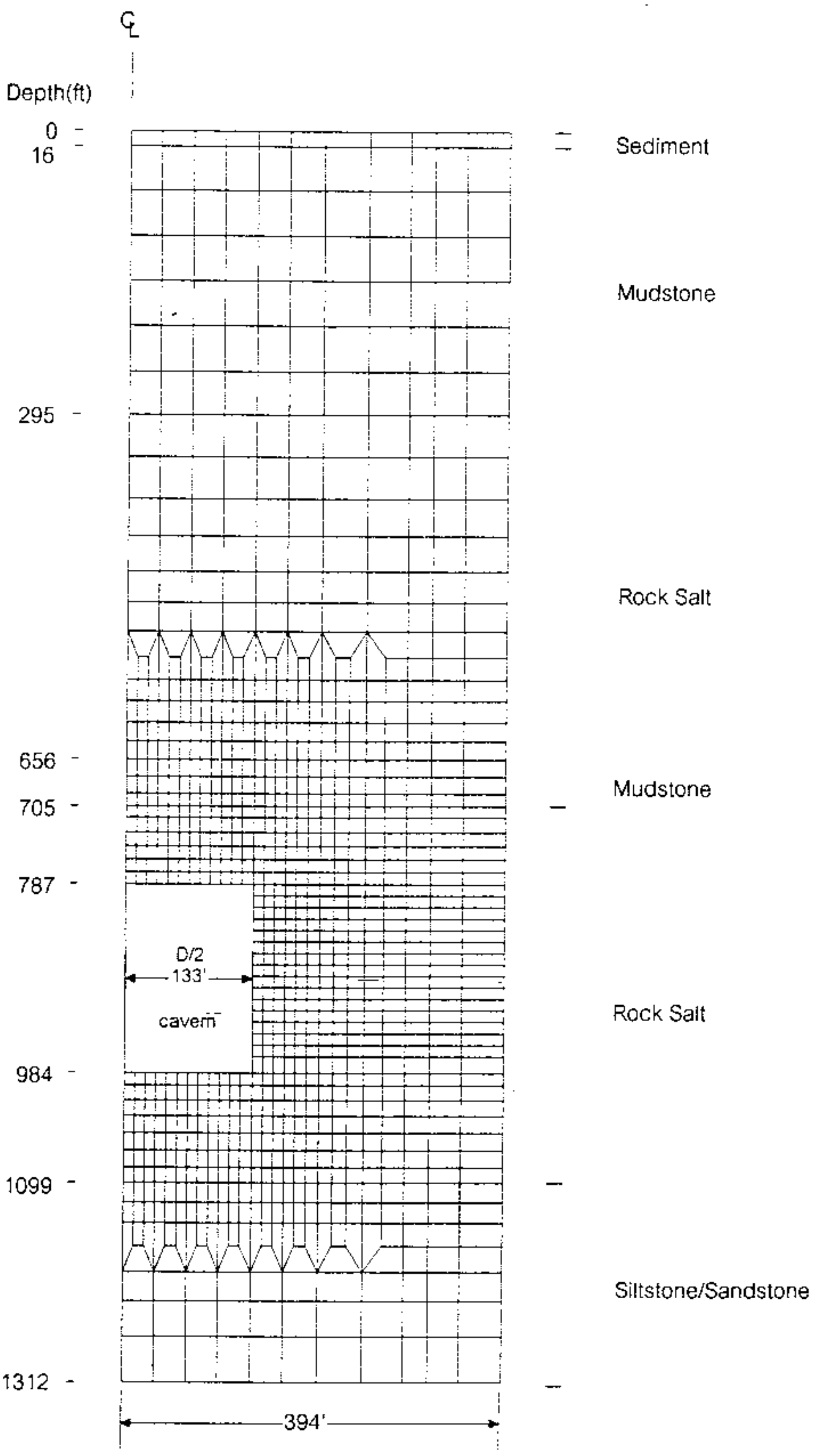
รูปที่ 13 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านวังกะอาม Model WK-2



รูปที่ 14 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านวังกะอาม Model WK-3

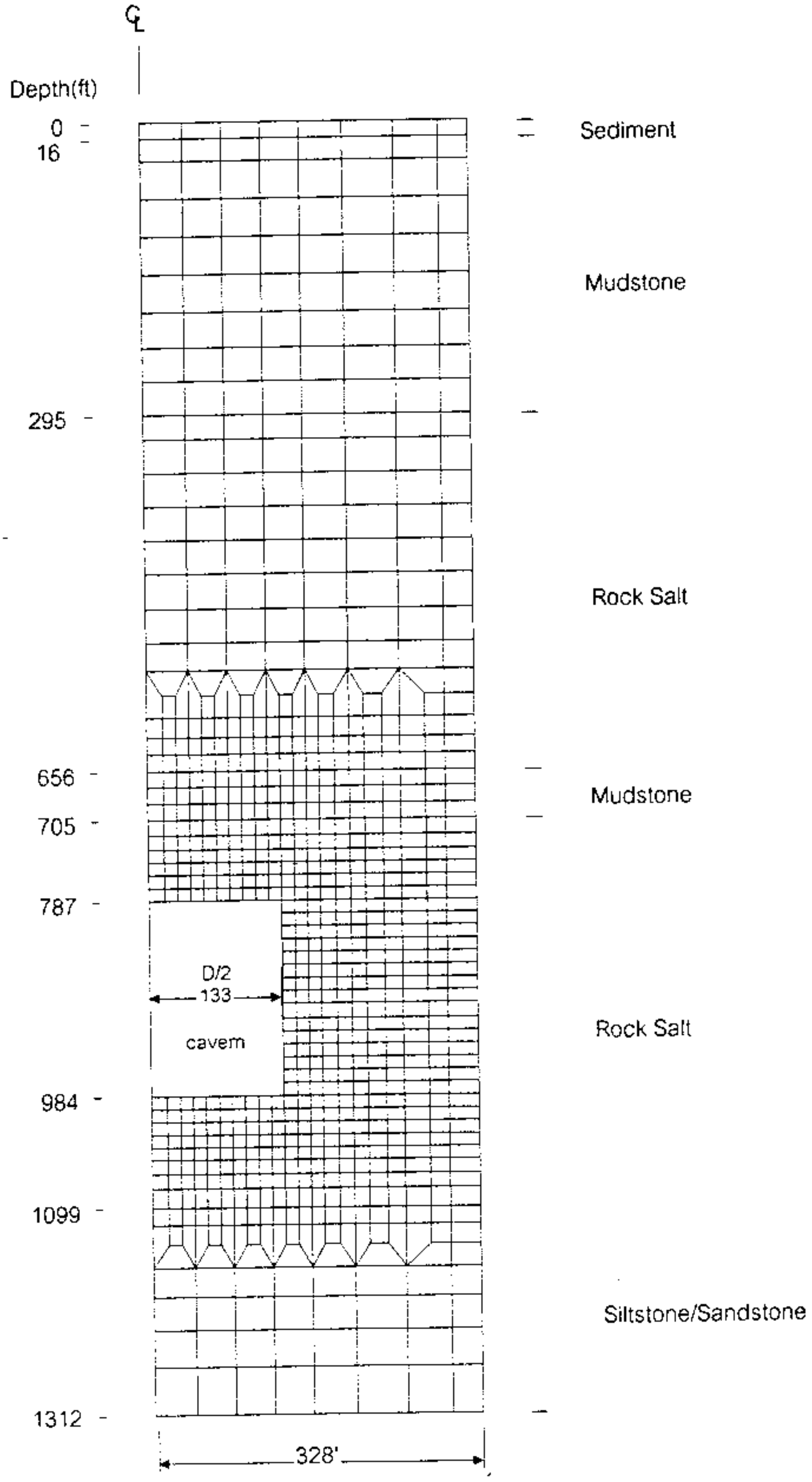


รูปที่ 15 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านวังกะอาม Model WK-4



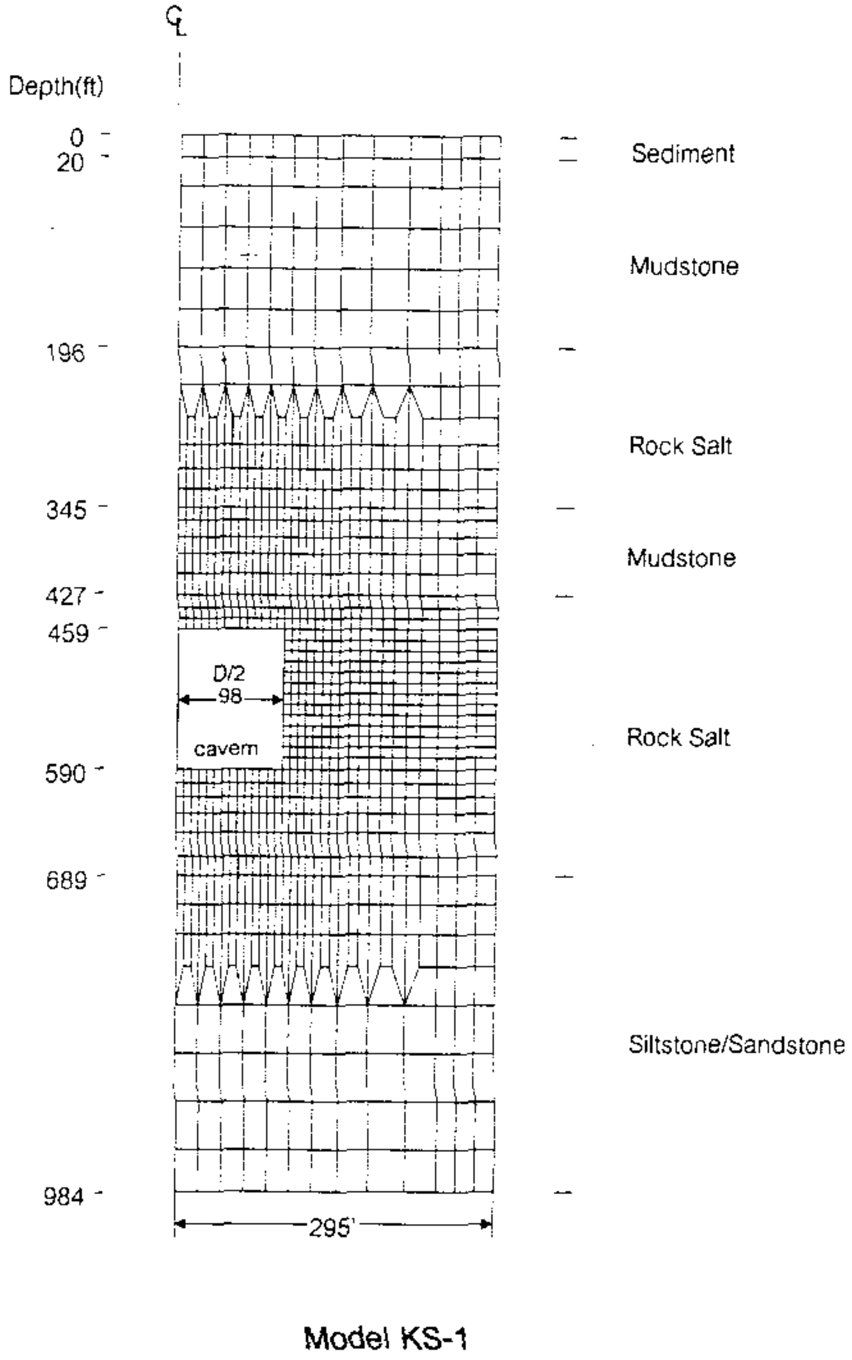
Model KF-1

รูปที่ 16 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกแฝก Model KF-1

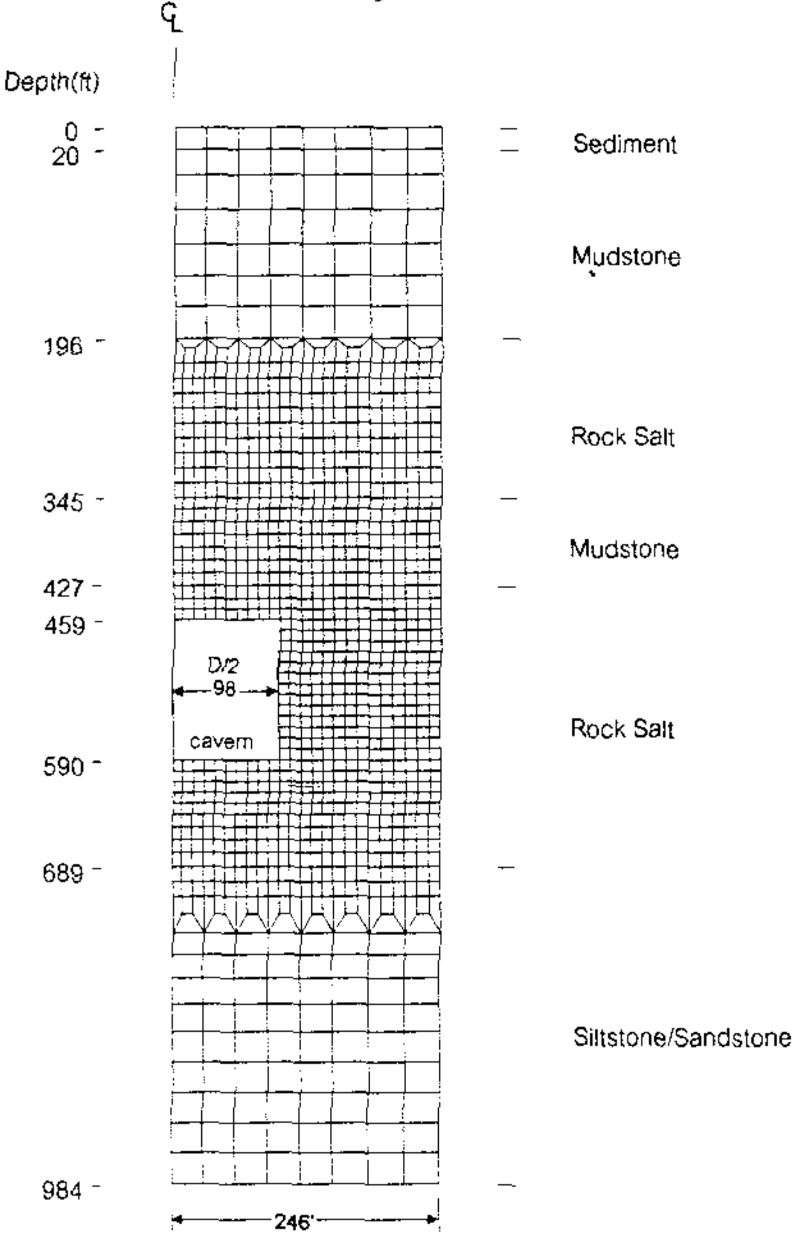


Model KF-2

รูปที่ 17 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกแฝก Model KF-2



รูปที่ 18 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกสว่าง Model KS-1



Model KS-2

รูปที่ 19 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกสว่าง Model KS-2

ตารางที่ 2 : ขนาดและรูปร่างของแบบจำลองโพรงในชั้นหินเกลือ

Model	Diameter (D) (m)	Height (H) (m)	Depth (d) (m)	Salt Roof (r) (m)	Spacing (S) (m)	H/D	S/D	D/d	D/r	Extraction Ratio (m^3/km^2)
Pimai	36	52	172	41	120	1:0.70	3.33:1	1:4.78	1:1.14	3.675×10^6
KS-1	60	40	140	80	180	1:1.50	3.00:1	1:2.33	1:1.33	3.490×10^6
KS-2	60	40	140	80	150	1:1.50	2.50:1	1:2.33	1:1.33	5.026×10^6
WK-1	80	60	180	125	240	1:1.33	3.00:1	1:2.25	1:1.56	5.236×10^6
WK-2	80	60	180	125	200	1:1.33	2.50:1	1:2.25	1:1.56	7.540×10^6
WK-3	80	60	142	87	240	1:1.33	3.00:1	1:0.91	1:1.08	5.236×10^6
WK-4	80	60	73	18	240	1:1.33	3.00:1	1:0.23	1:0.23	5.236×10^6
KF-1	80	60	240	150	240	1:1.33	3.00:1	1:3.00	1:1.88	5.236×10^6
KF-2	80	60	240	150	200	1:1.33	2.50:1	1:3.00	1:1.88	7.540×10^6

ตารางที่ 3 : จำนวน Node และ Element ในแบบจำลอง

Model	Number of Node	Number of Element
KS-1	1092	1205
KS-2	976	911
WK-1	1089	1030
WK-2	902	874
WK-3	1340	1264
WK-4	1208	1136
KF-1	1175	1104
KF-2	1051	982

3.3 ความเค้นในหิน (In-situ Stress)

ความเค้นในชั้นหินเกลือและชั้นหินที่เกี่ยวข้องจะถูกคำนวณจากสมมติฐานที่ว่า ชั้นหินทั้งหมดอยู่ภายใต้แรงกดแบบ Hydrostatic ดังนั้นการคำนวณความเค้นในหินทั้งในแนวดิ่งและแนวนอนที่ความลึกใด ๆ ก็สามารถทำได้เมื่อเรารู้ค่าความถ่วงจำเพาะของหินแต่ละชั้น ข้อสมมติฐานนี้ค่อนข้างจะใกล้เคียงความจริงเนื่องจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นลักษณะแอ่งที่อยู่ในที่ราบสูง ถึงแม้จะไม่มีการวัดค่าความเค้นในชั้นหินนี้ (In-situ Stress) แต่ว่าการคำนวณแบบ Hydrostatic จะได้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างปลอดภัย โดยเฉพาะในเชิงออกแบบและวิเคราะห์

แรงดันที่อยู่ในโพรงจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของน้ำเกลือ ความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลือจะมีค่าโดยประมาณที่ 0.42 psi per ft ที่อุณหภูมิปกติ (Ambient temperature) ค่านี้จะนำมาคำนวณหาความดันในโพรงโดยใช้ความลึกของหลังคาโพรง ผนังของโพรงและพื้นของโพรงเข้ามาใช้ในการคำนวณ

สำหรับหินเกลือค่าความถ่วงจำเพาะในเชิงความลึกจะสามารถคำนวณได้จากค่า 0.937 psi per ft ส่วนในชั้นหินดินดานและหินตะกอนจะคำนวณได้จาก 1.10 psi per ft ค่านี้ที่นำมาใช้จะมีค่าประมาณ 10% สูงกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของหินนั้น ๆ เนื่องจากว่าจะต้องมีการทดแทนเพราะการวิเคราะห์ในแบบจำลองนี้จะสมมติว่าผังของตัวโพรงทั้งหมดอยู่ใน plane strain assumption การทดแทนเพื่อให้หินมีความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น (หรือหนักขึ้น) จะได้ผลลัพธ์ที่ปลอดภัย เพราะค่าเหล่านี้จะถูกแปรมาเป็นความเค้นในชั้นหินรอบ ๆ ตัวโพรง เพื่อป้อนเป็นข้อมูลในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

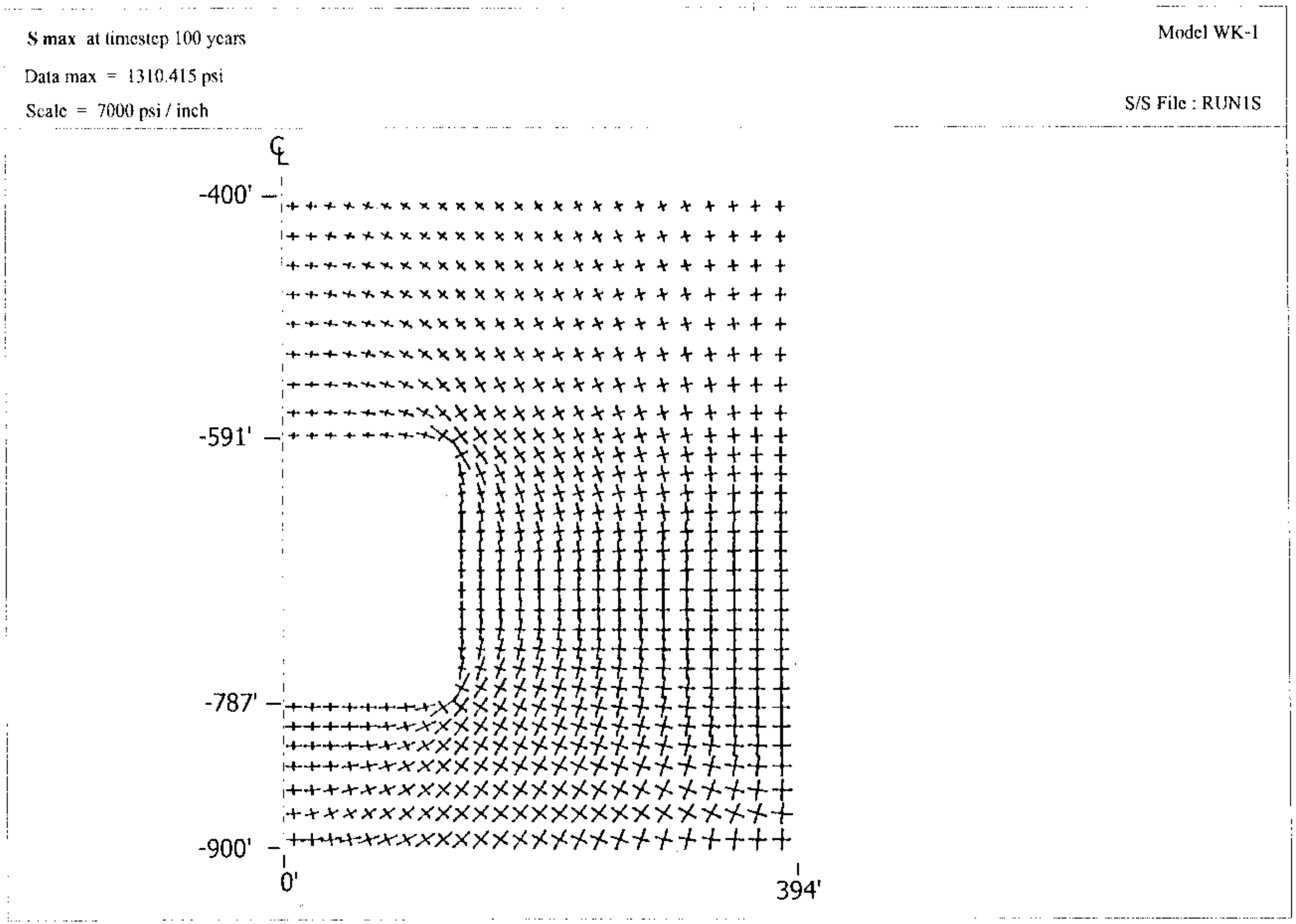
บทที่ 4
ผลของการคำนวณ

การคำนวณโดยใช้ Finite element program GEO จะมุ่งไปที่การพิจารณาความเค้นในแกนหลัก (Principal stresses) ความเครียดในแกนหลัก (Principal strains) การหดตัวของโพรง (Cavern closure) การทรุดตัวของผิวดิน (Surface subsidence) และการเพิ่มความซึมผ่านในชั้นหินเกลือ (Permeability increase) และประเมินการประพฤติตัวและเสถียรภาพอันยาวนาน ซึ่งจะเป็นเป้าหมายอันสูงสุด ดังนั้นผลการคำนวณทางด้านพฤติกรรมของหินเกลือทั้งทางด้านกลศาสตร์และความซึมผ่านหลังจากที่โพรงได้ถูกละลายขึ้นมาแล้ว 100 ปี จะถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้

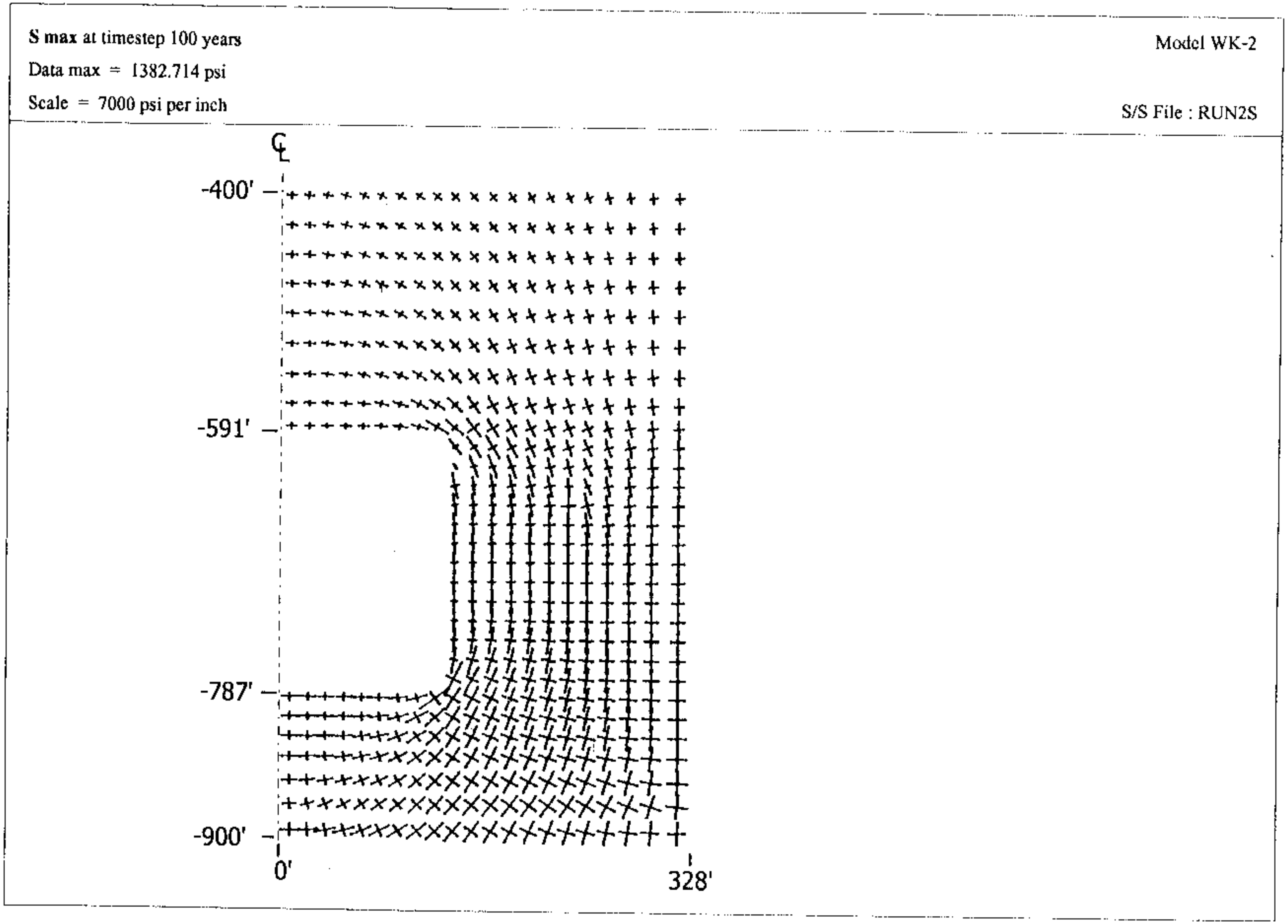
รูปที่ 20-27 แสดงขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลัก (Principal stresses) ในชั้นหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรงที่มีอายุ 100 ปีของแบบจำลอง WK-1, WK-2, WK-3, WK-4, KS-1, KS-2, KF-1 และ KF-2 ตามลำดับ ความเค้นที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณมุมล่างและบนของโพรง ผลกระทบจากการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างโพรงต่อค่าความเค้นในแต่ละพื้นที่จะมีไม่มากนัก (เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง KS-1 และ KS-2 เป็นต้น) เช่นเดียวกันผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความลึกของหลังคาโพรงต่อค่าความเค้นรอบ ๆ โพรงก็จะไม่ต่างกัน

รูปที่ 28-35 แสดงขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลัก (Principal strains) ในชั้นหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรงที่มีอายุ 100 ปีของแบบจำลอง WK-1, WK-2, WK-3, WK-4, KS-1, KS-2, KF-1 และ KF-2 ตามลำดับ ขนาดและทิศทางของความเครียดนี้จะบ่งบอกให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปของโพรงหลังจากที่ได้ถูกละลายขึ้น ซึ่งในที่สุดแล้วการเปลี่ยนรูปนี้จะแสดงออกมาในรูปของการหดตัวในแนวตั้งและในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณของโพรงที่มีระยะห่างต่างกันจะเห็นได้ว่า ถ้าระยะห่างของโพรงลดลงคือ ลดลงจาก 3:1 เป็น 2.5:1 การเปลี่ยนรูปของหินเกลือรอบโพรงจะมีมากขึ้น ส่วนผลกระทบจากความลึกของโพรงต่อความเครียดในแกนหลักนั้น แบบจำลองที่บ้านวังกะอามระบุว่า ถ้าโพรงอยู่ตื้นขึ้นเข้าใกล้กับชั้นหินดินดานที่วางตัวอยู่ชั้นบนการเปลี่ยนรูปของหินเกลือรอบโพรงก็จะมีสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นหินที่วางตัวอยู่บนหลังคาของโพรง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 28 รูปที่ 30 และรูปที่ 31

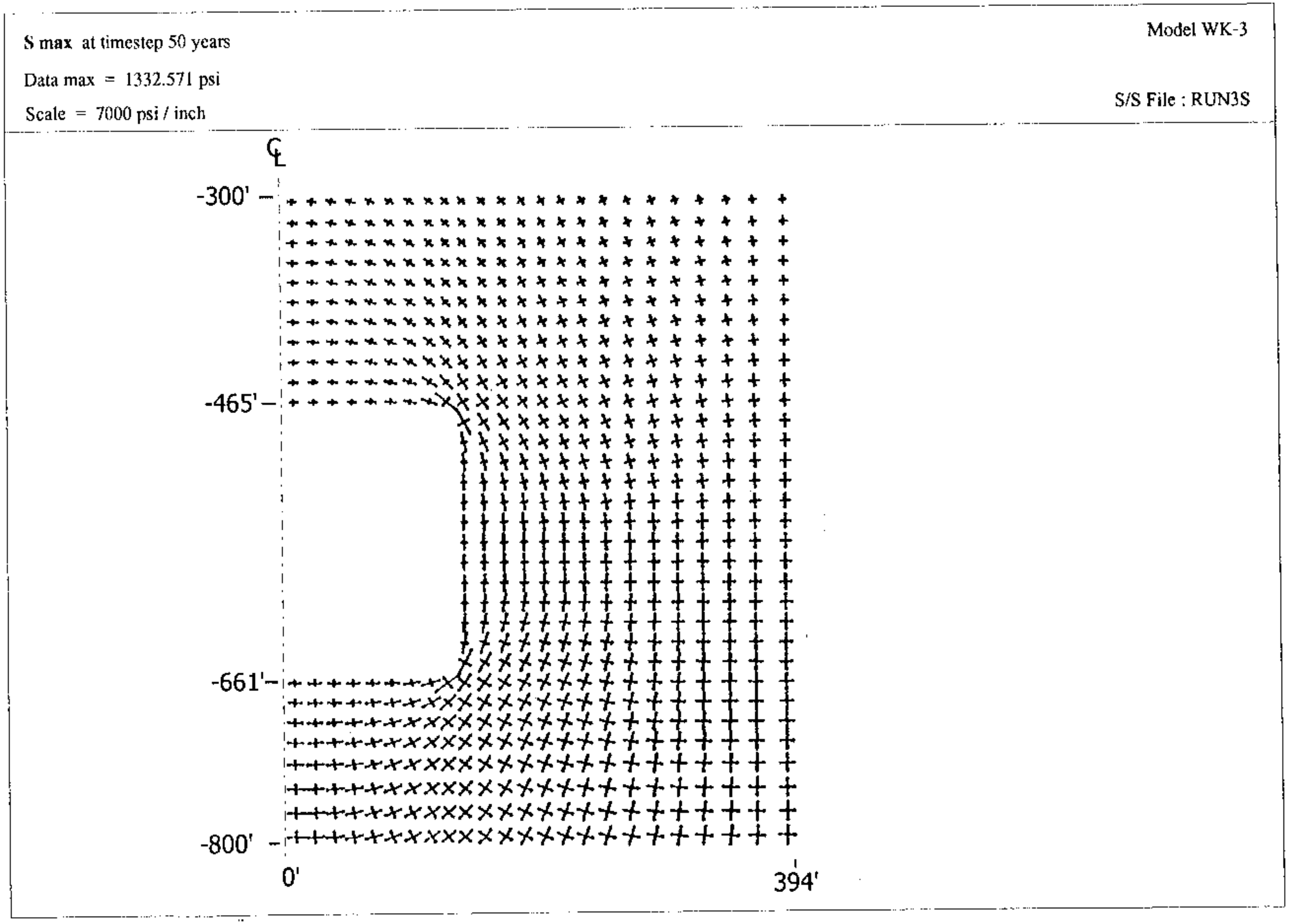
ผลการคำนวณระบุว่าไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองใด ในบริเวณมุมล่างและบนของโพรงจะมีความเค้นในแนวเฉือน (Octahedral shear stresses) สูงขึ้น ถ้าระยะห่างระหว่างโพรงลดลงจาก S/D = 3:1 เป็น S/D = 2.5:1 ค่าของความเค้นในแนวเฉือนในบริเวณมุมของโพรงจะมีแนวโน้มสูงขึ้น รูปที่ 36-43 แสดงการกระจายตัวของความเค้นในแนวเฉือนรอบโพรงของแบบจำลองต่าง ๆ กัน ส่วน



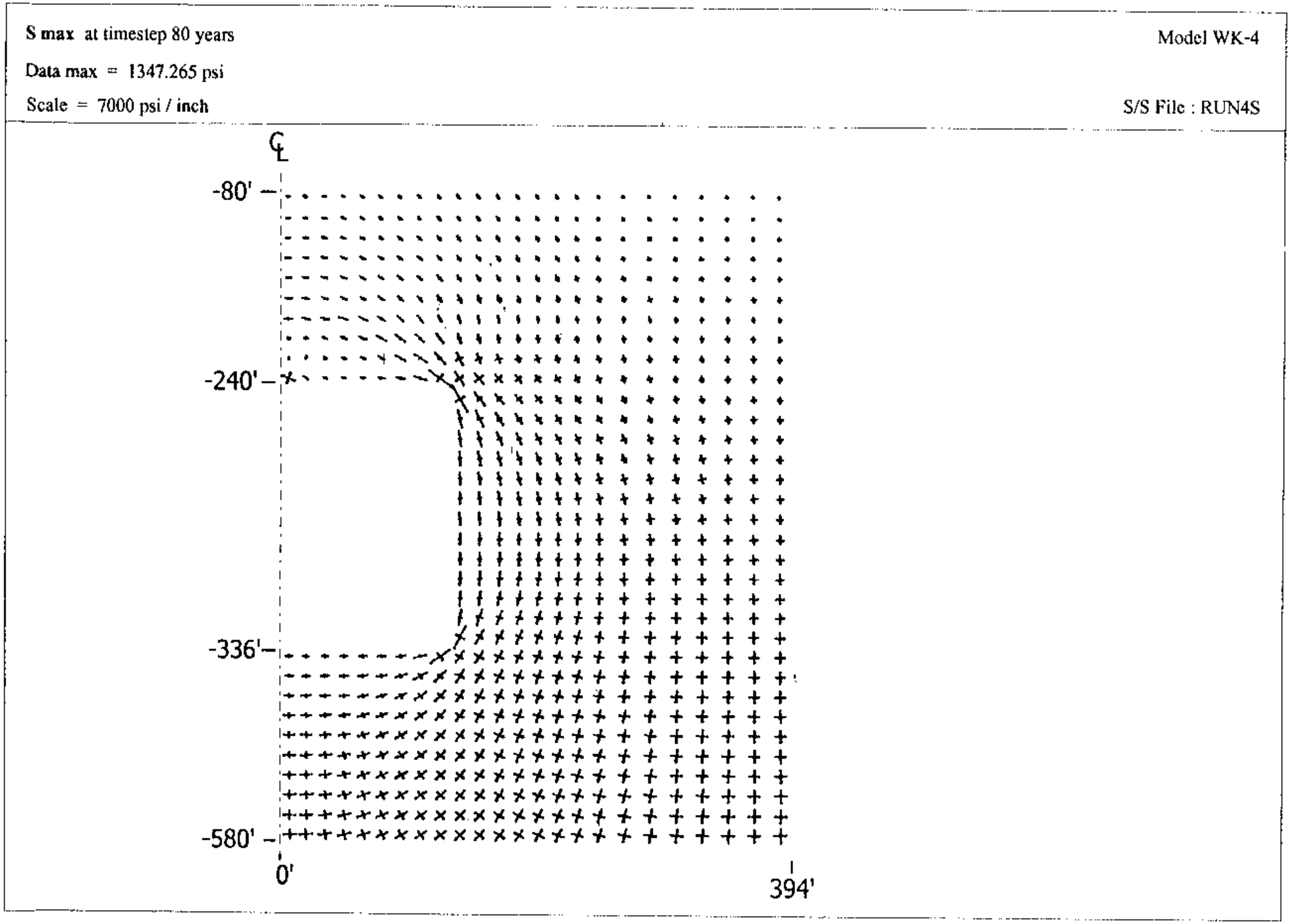
รูปที่ 20 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-1



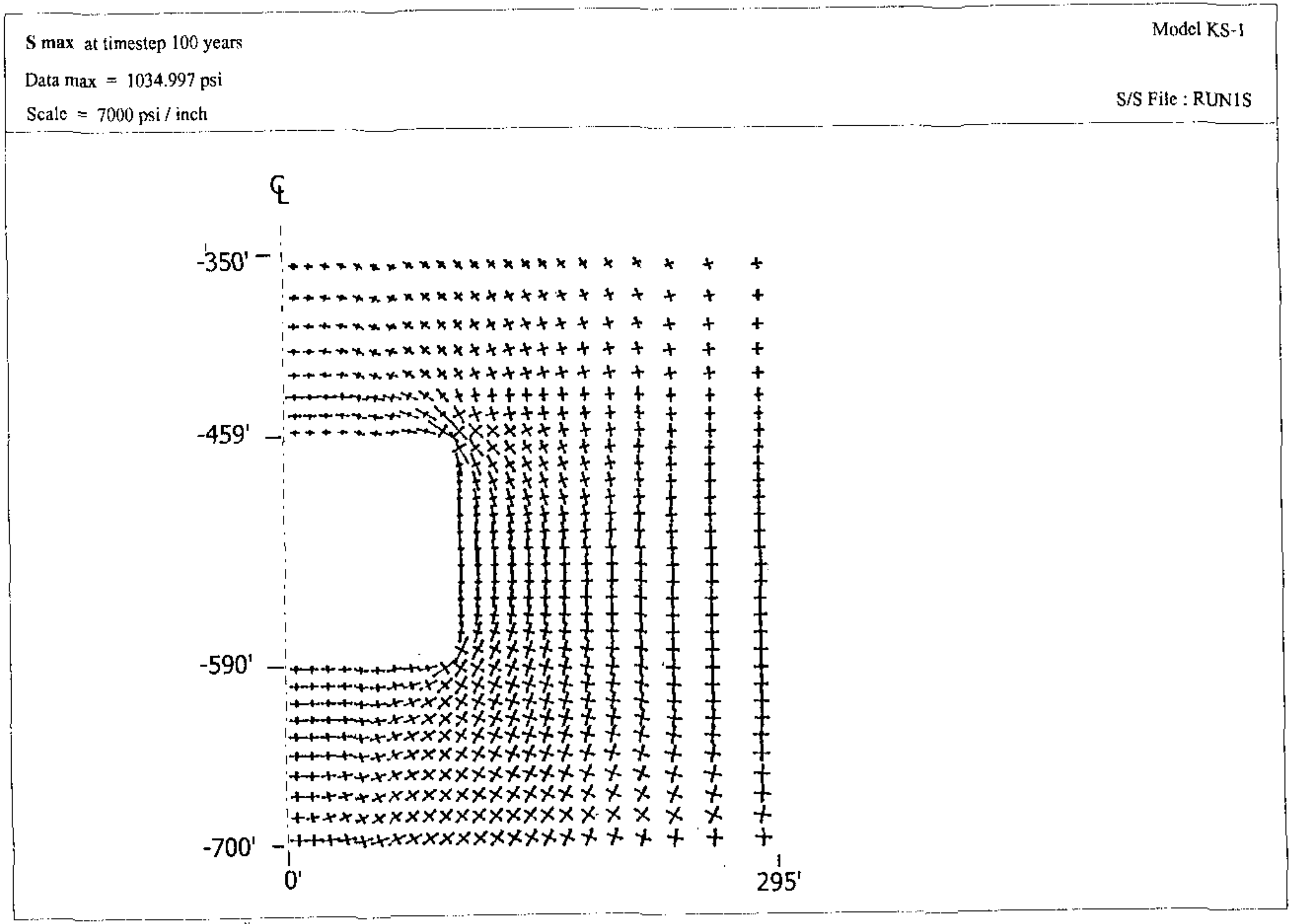
รูปที่ 21 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-2



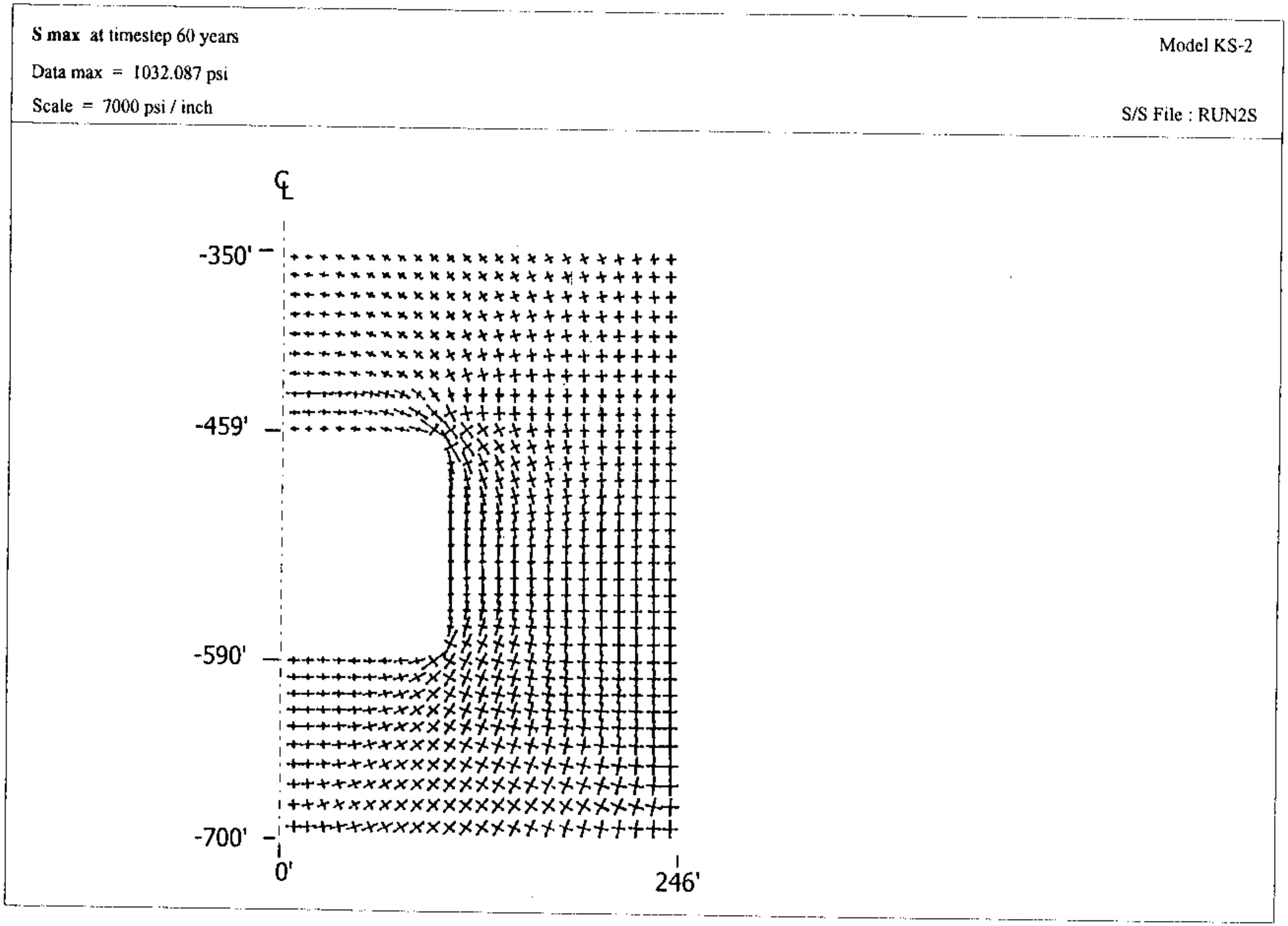
รูปที่ 22 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-3



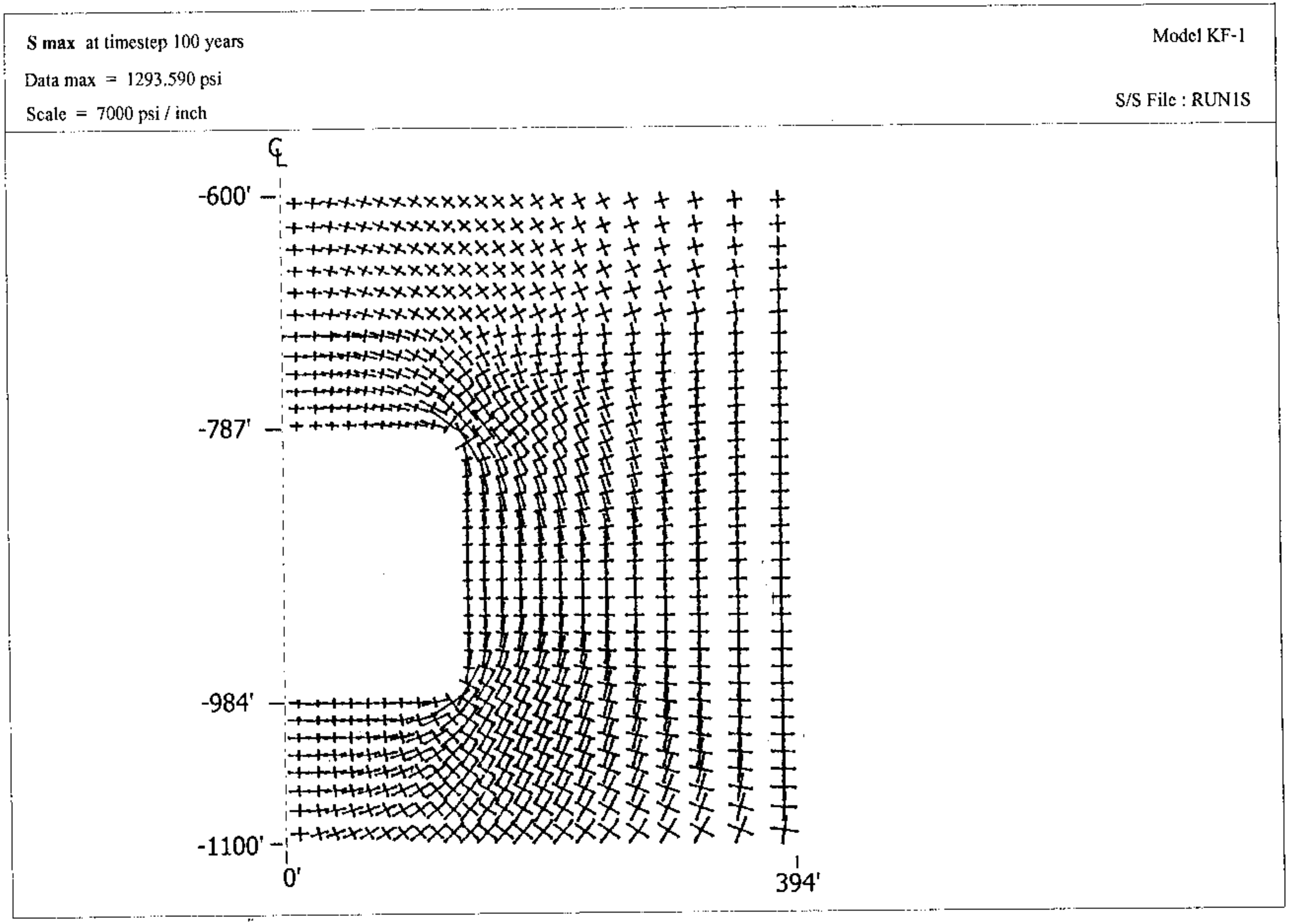
รูปที่ 23 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-4



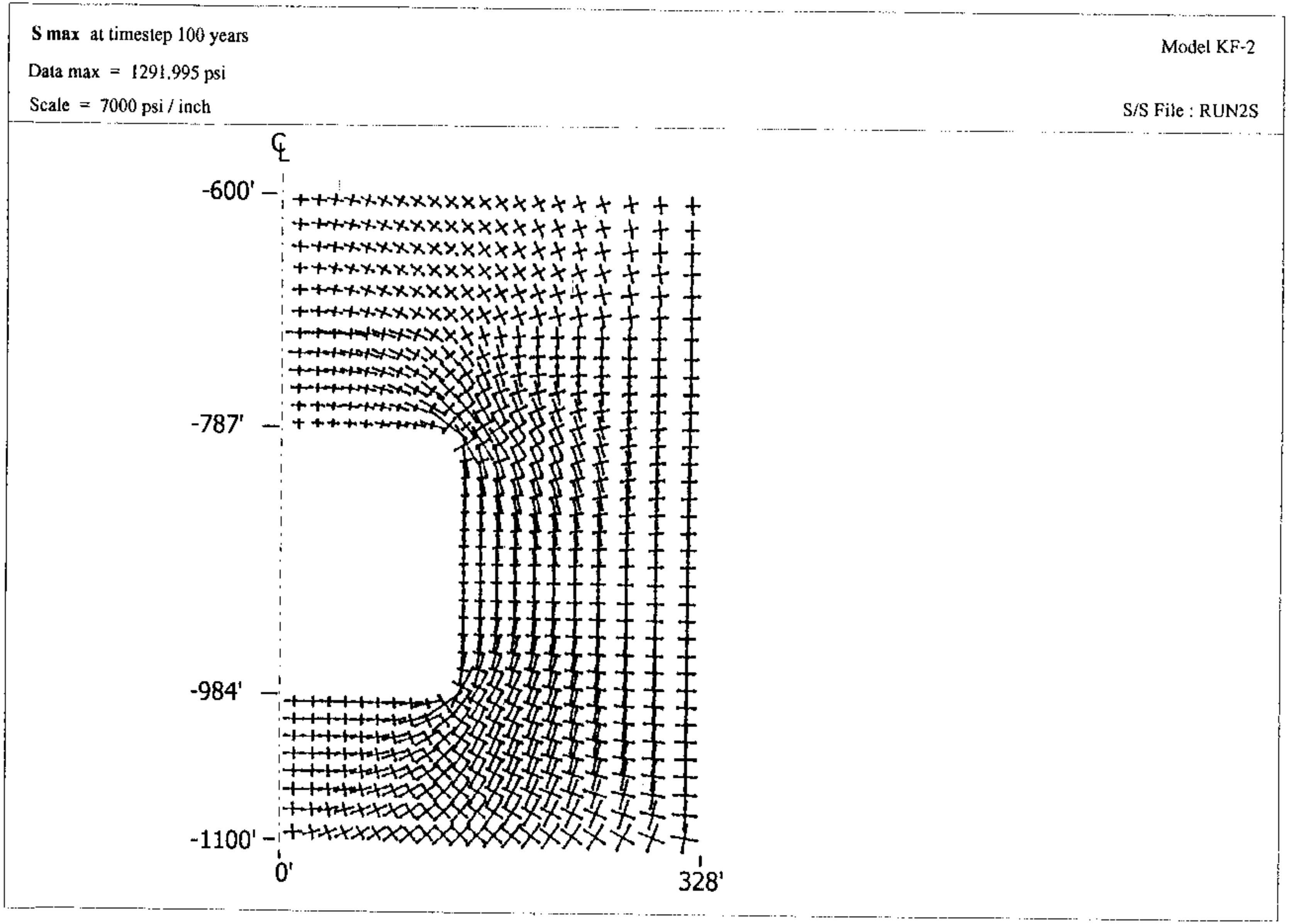
รูปที่ 24 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-1



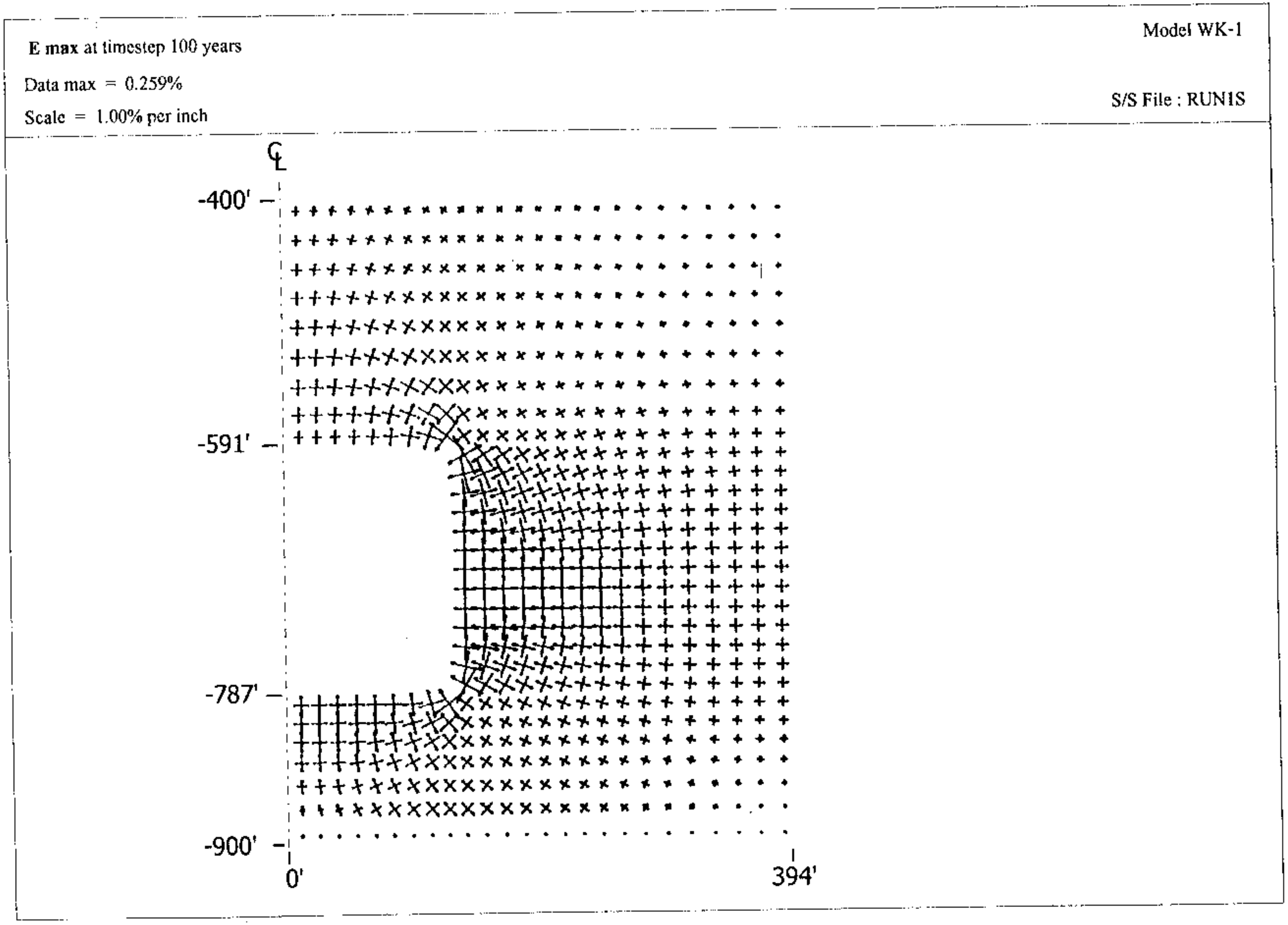
รูปที่ 25 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-2



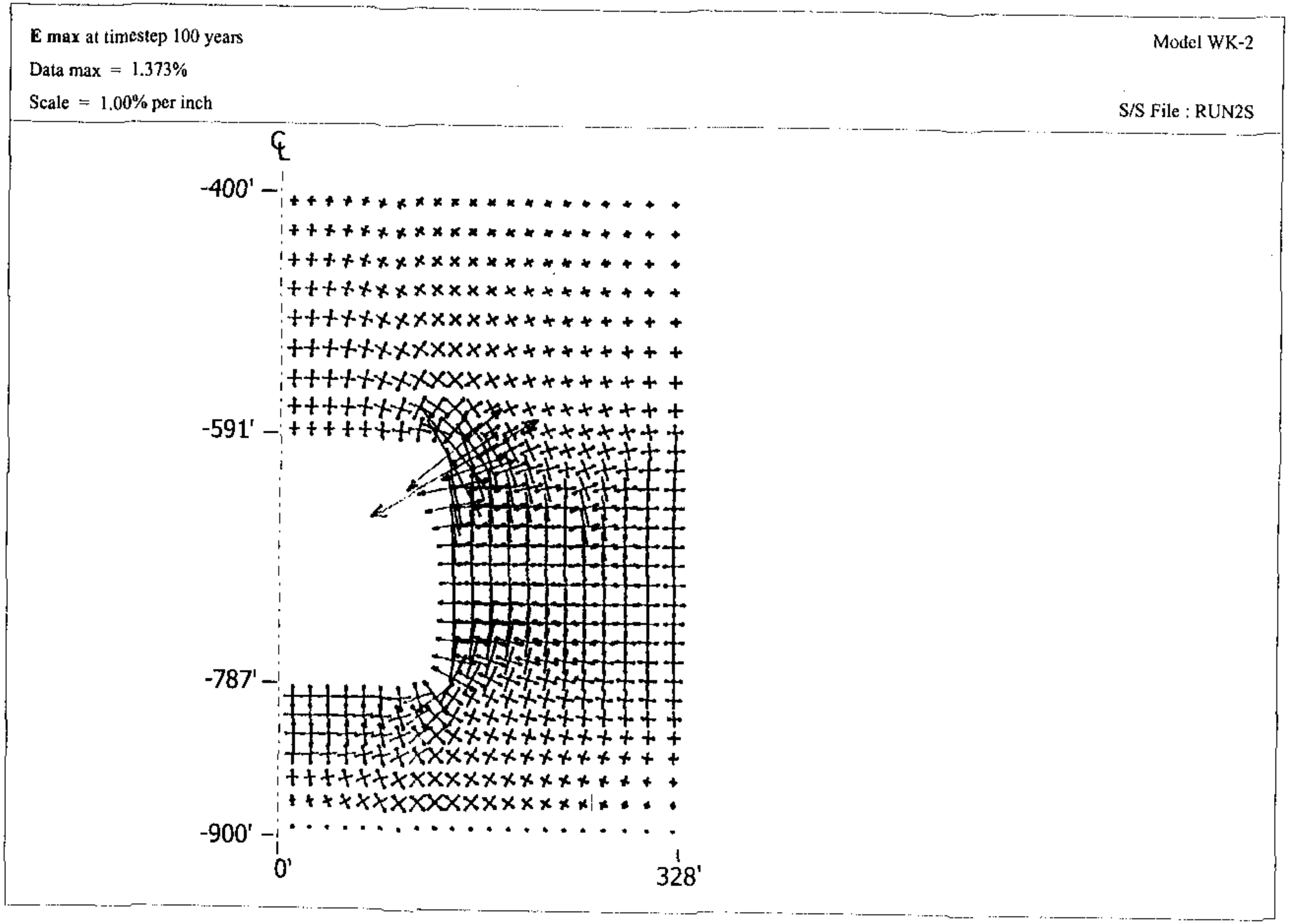
รูปที่ 26 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-1



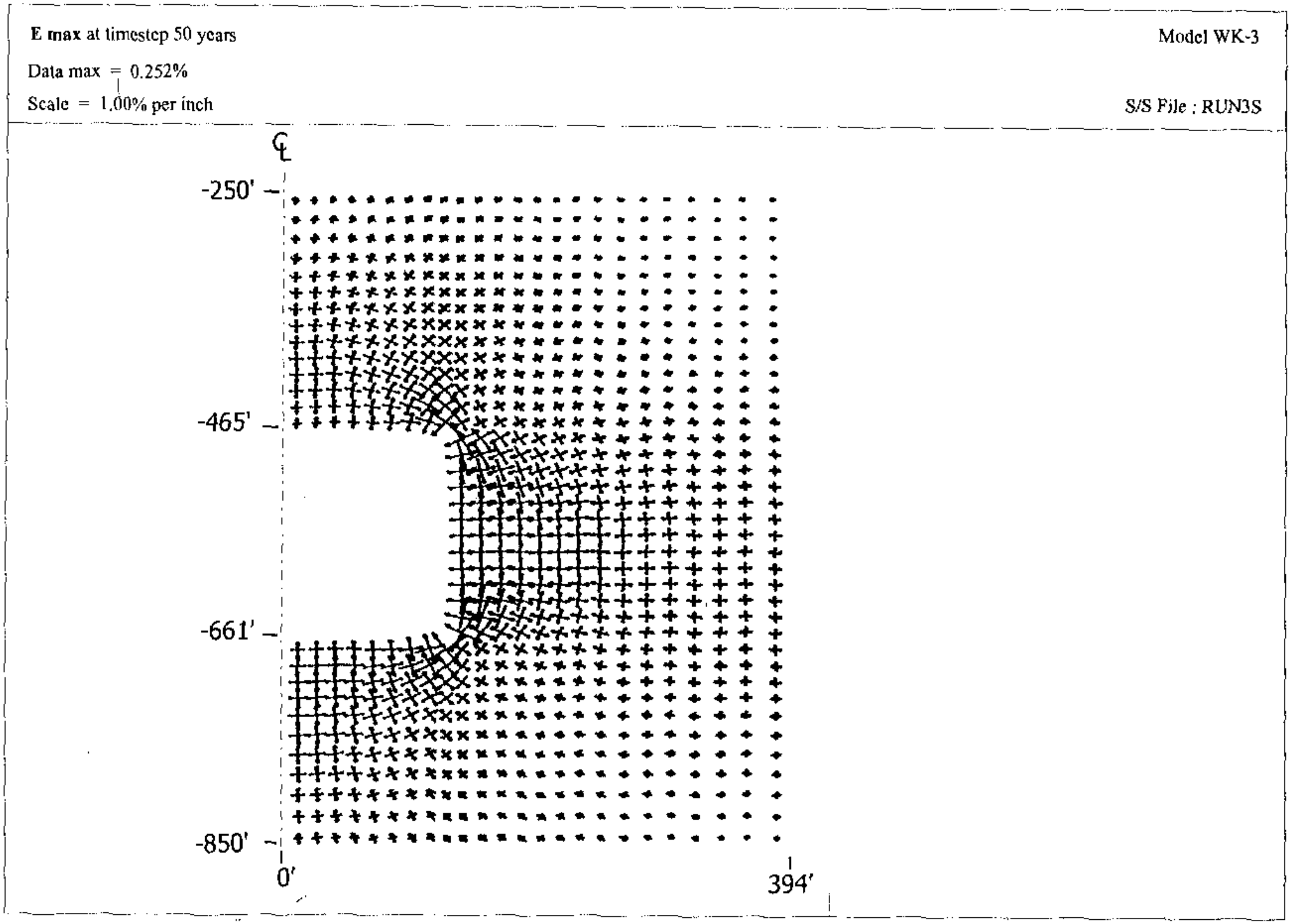
รูปที่ 27 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-2



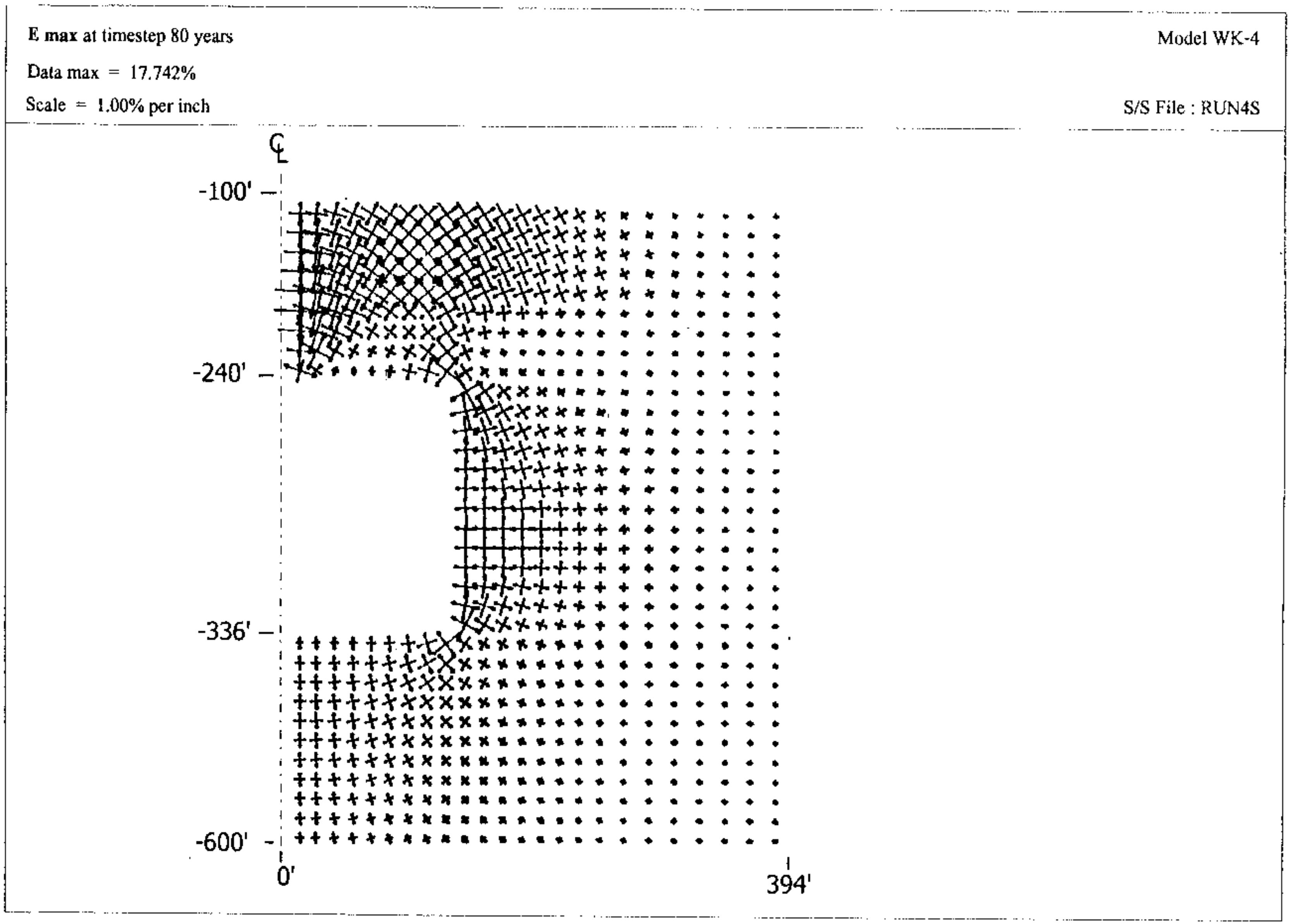
รูปที่ 28 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-1



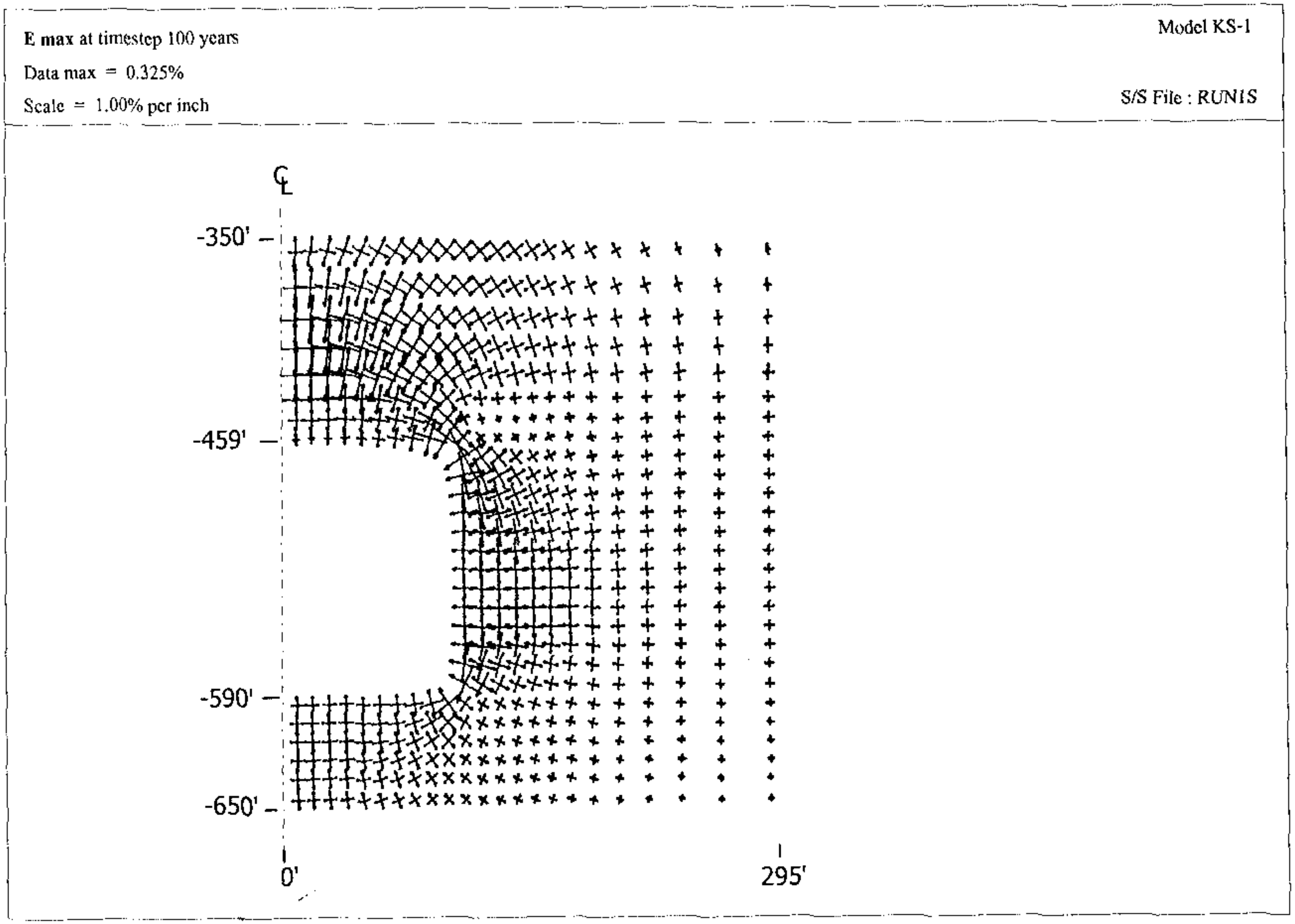
รูปที่ 29 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-2



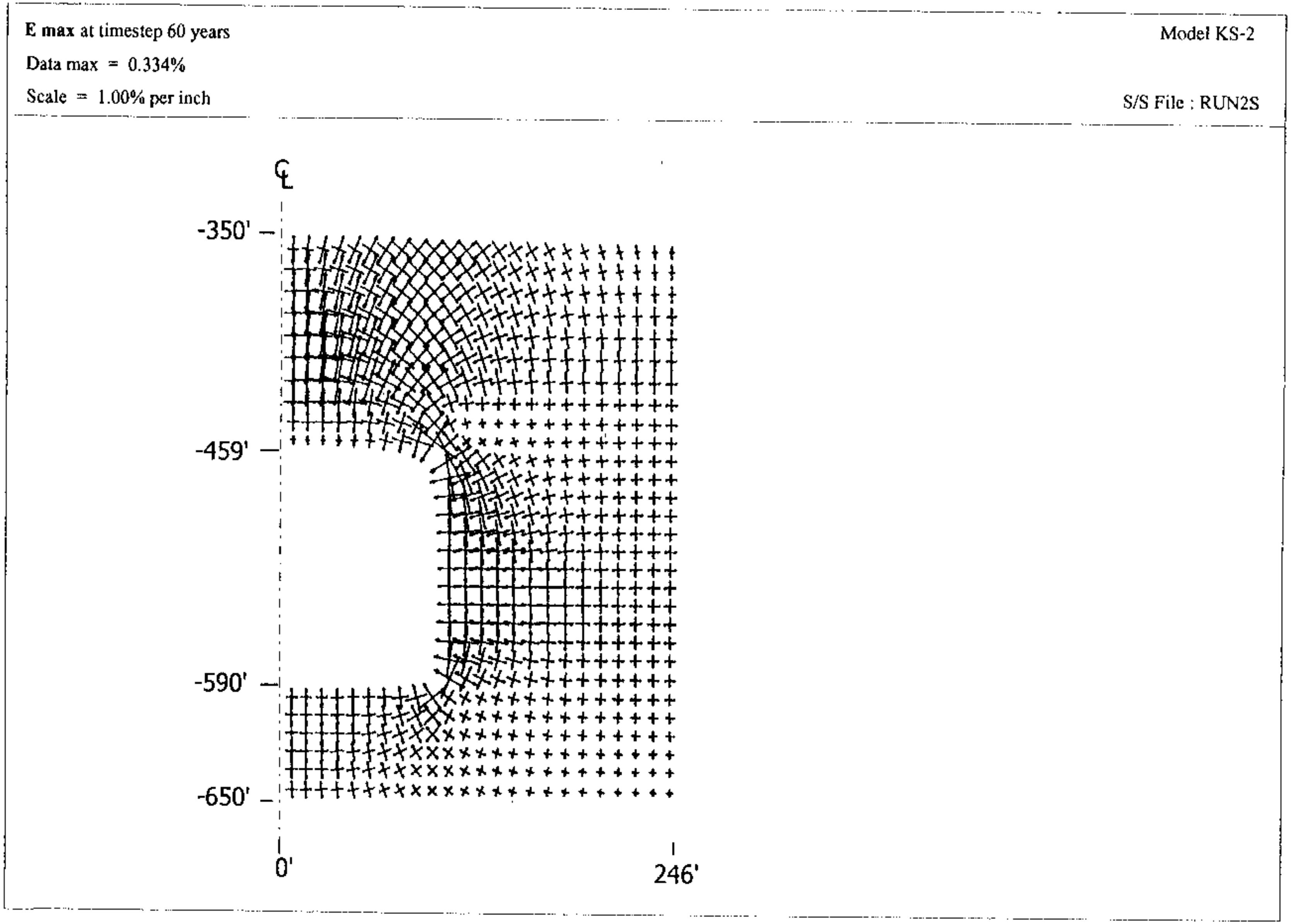
รูปที่ 30 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-3



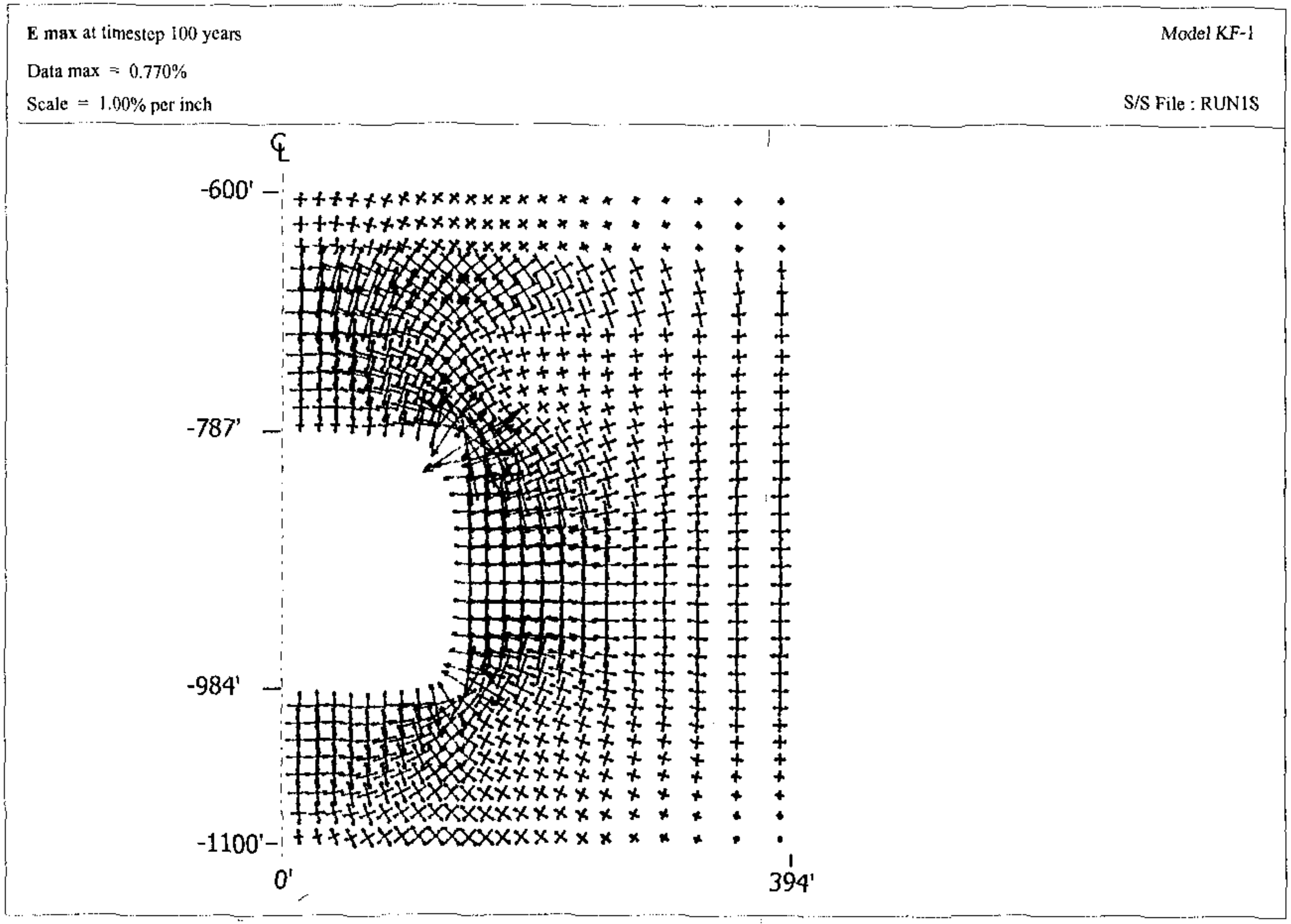
รูปที่31 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-4



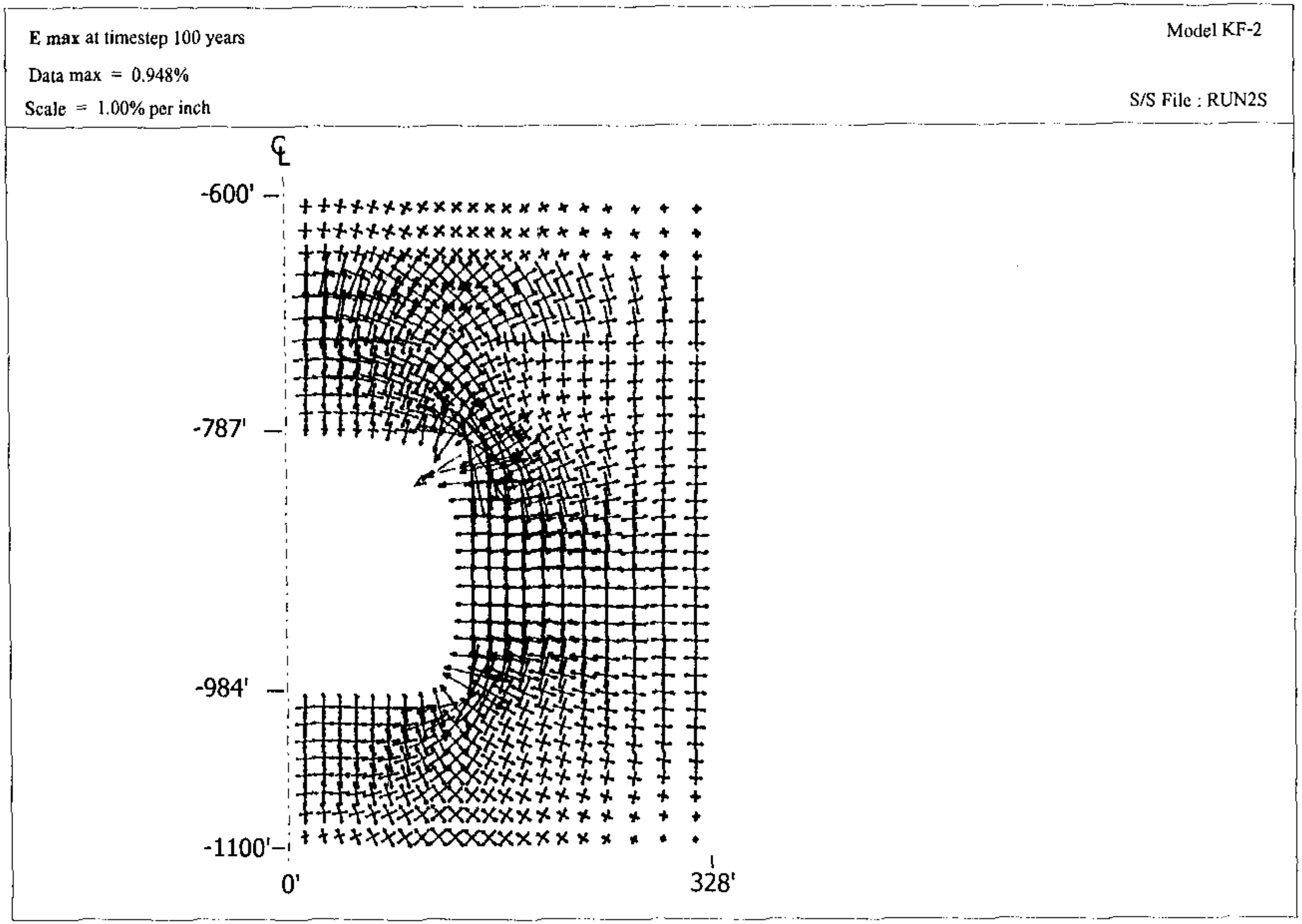
รูปที่ 32 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-1



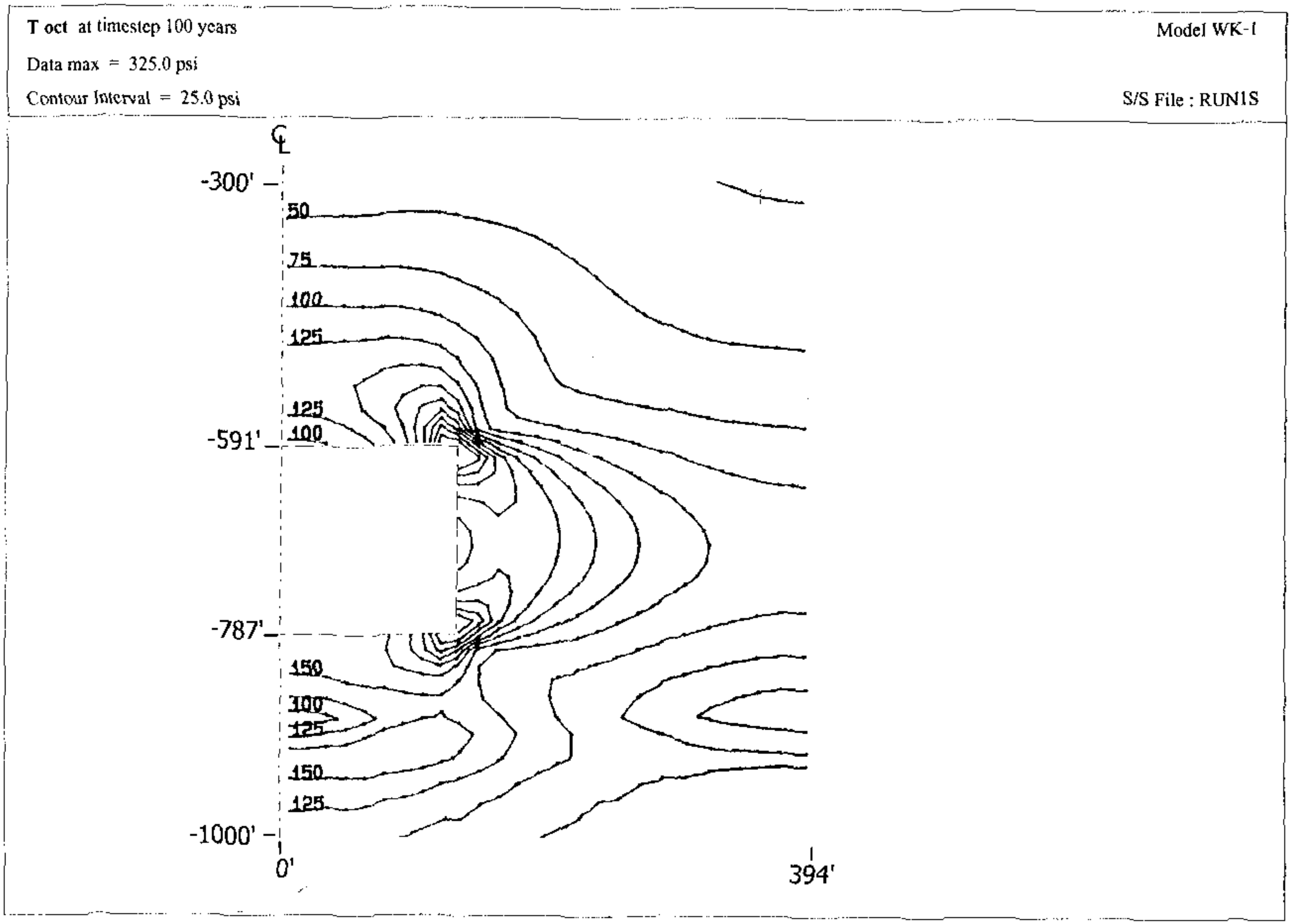
รูปที่ 33 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-2



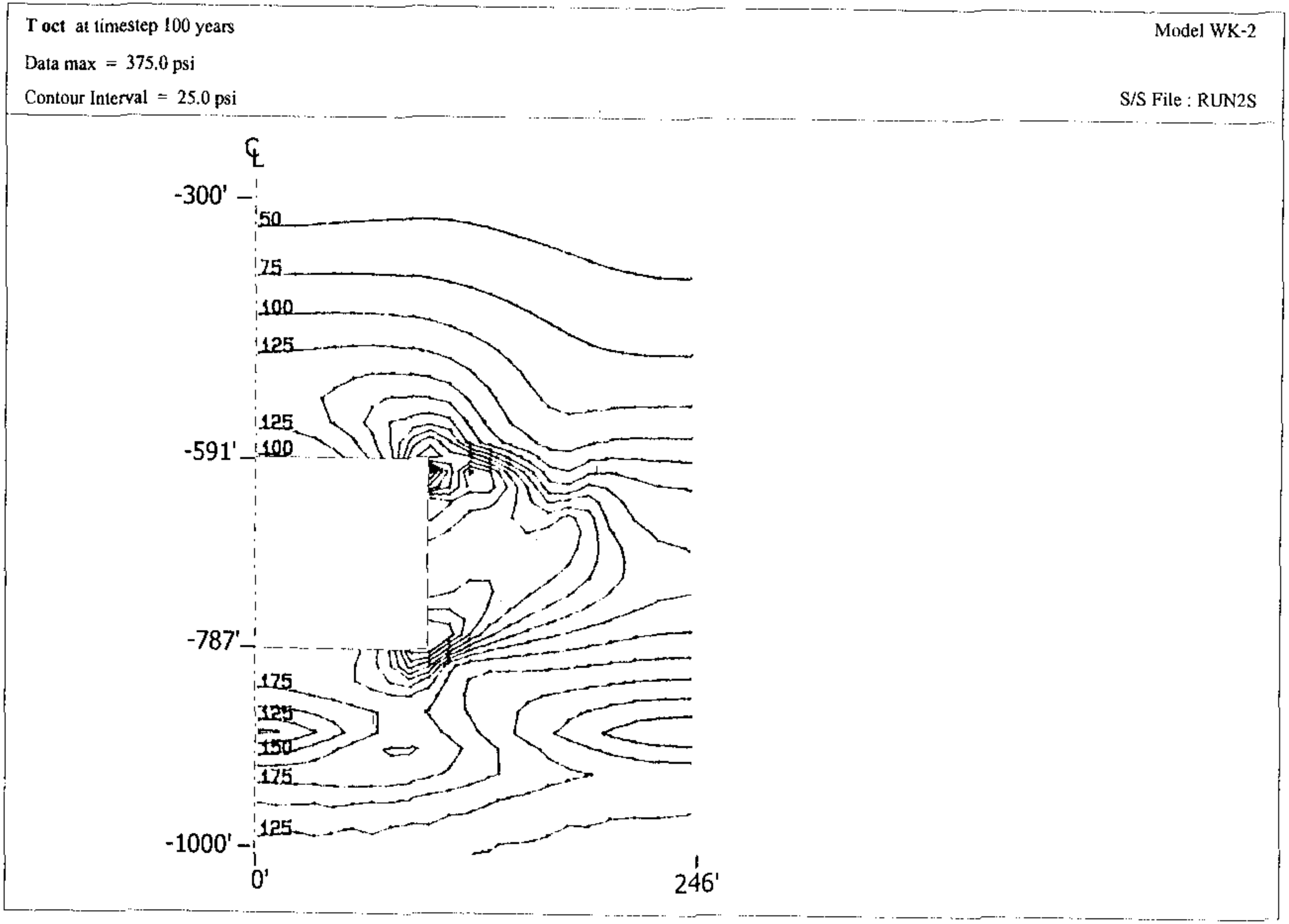
รูปที่ 34 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-1



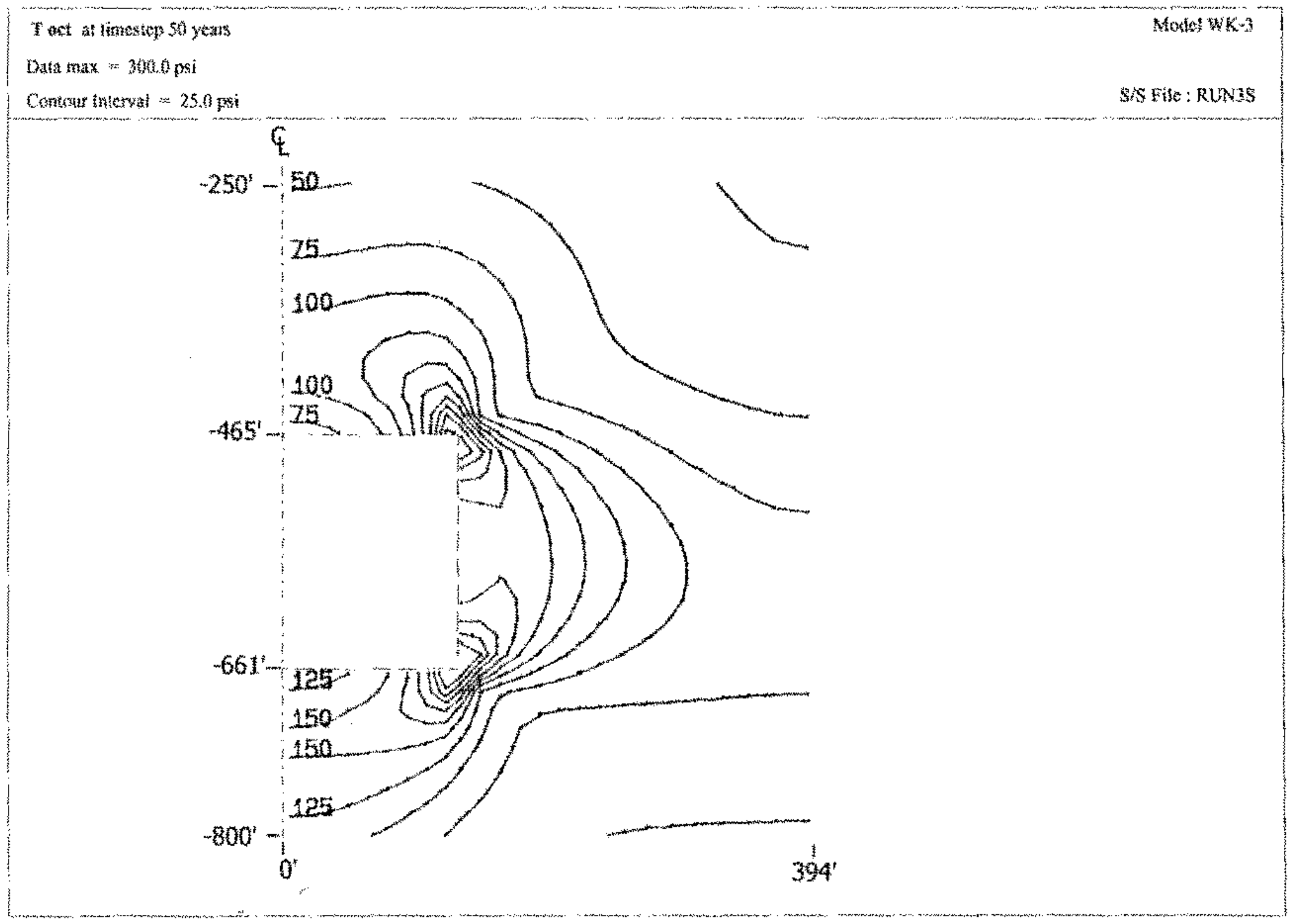
รูปที่ 35 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-2



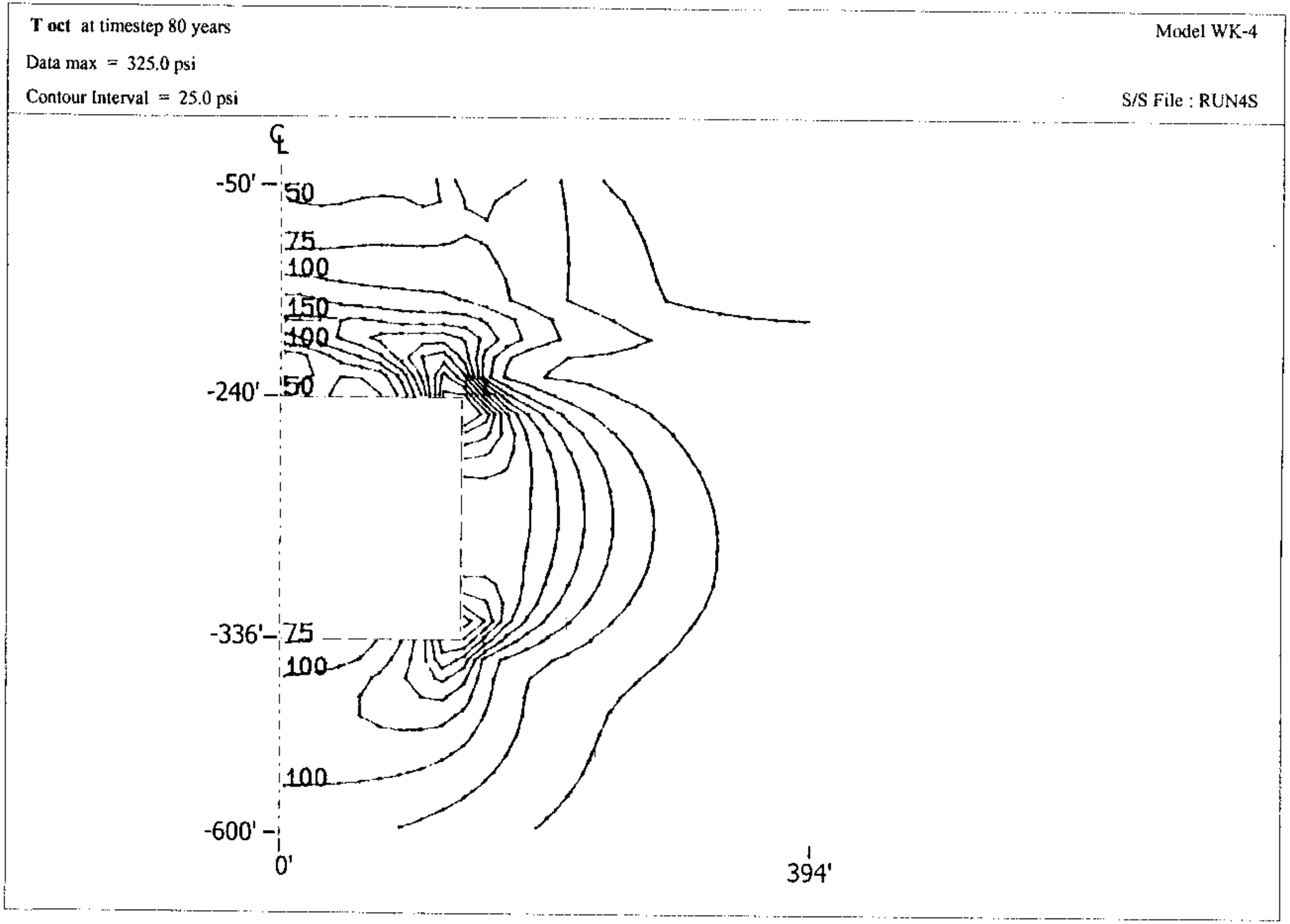
รูปที่ 36 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-1



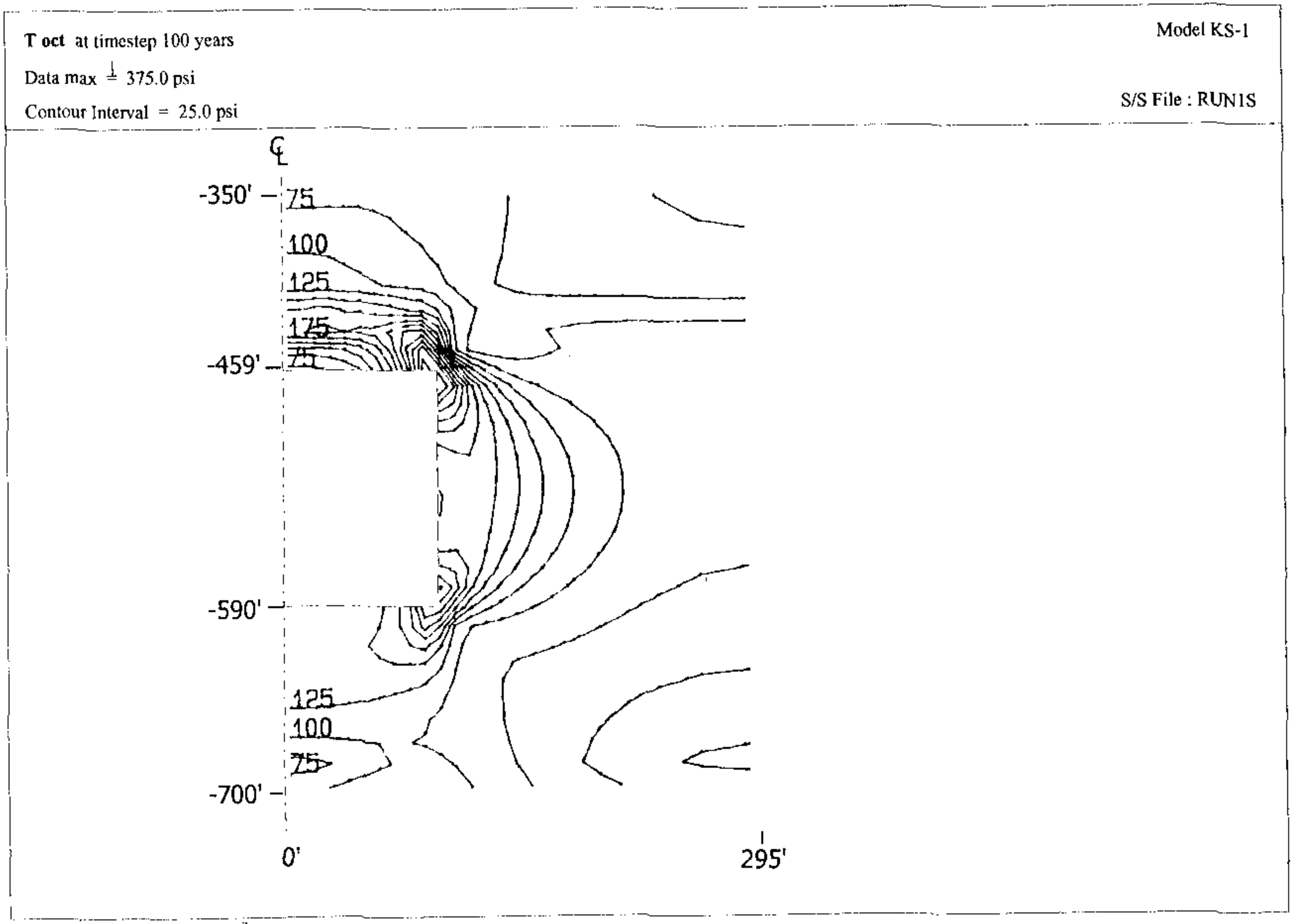
รูปที่ 37 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-2



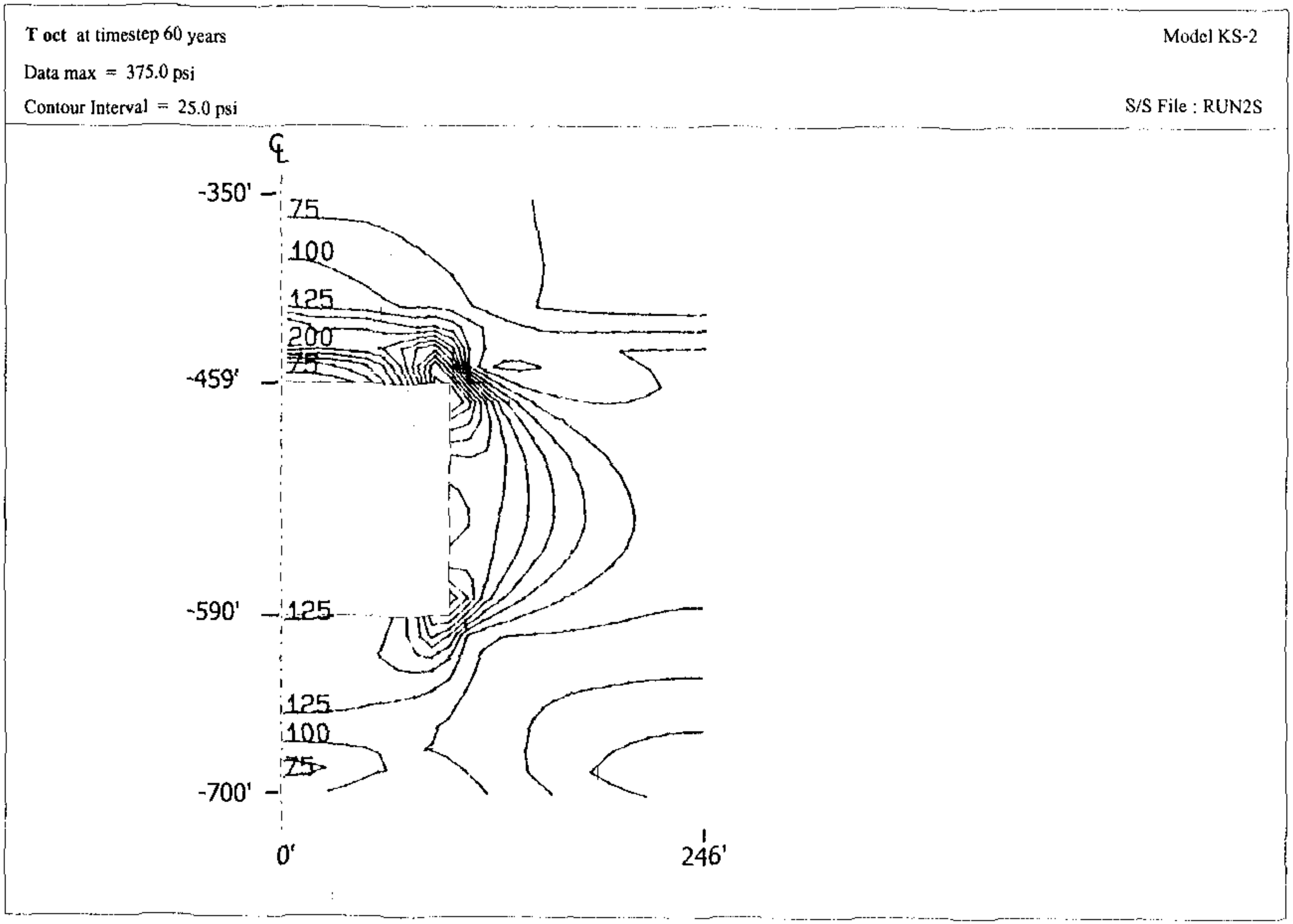
รูปที่ 38 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-3



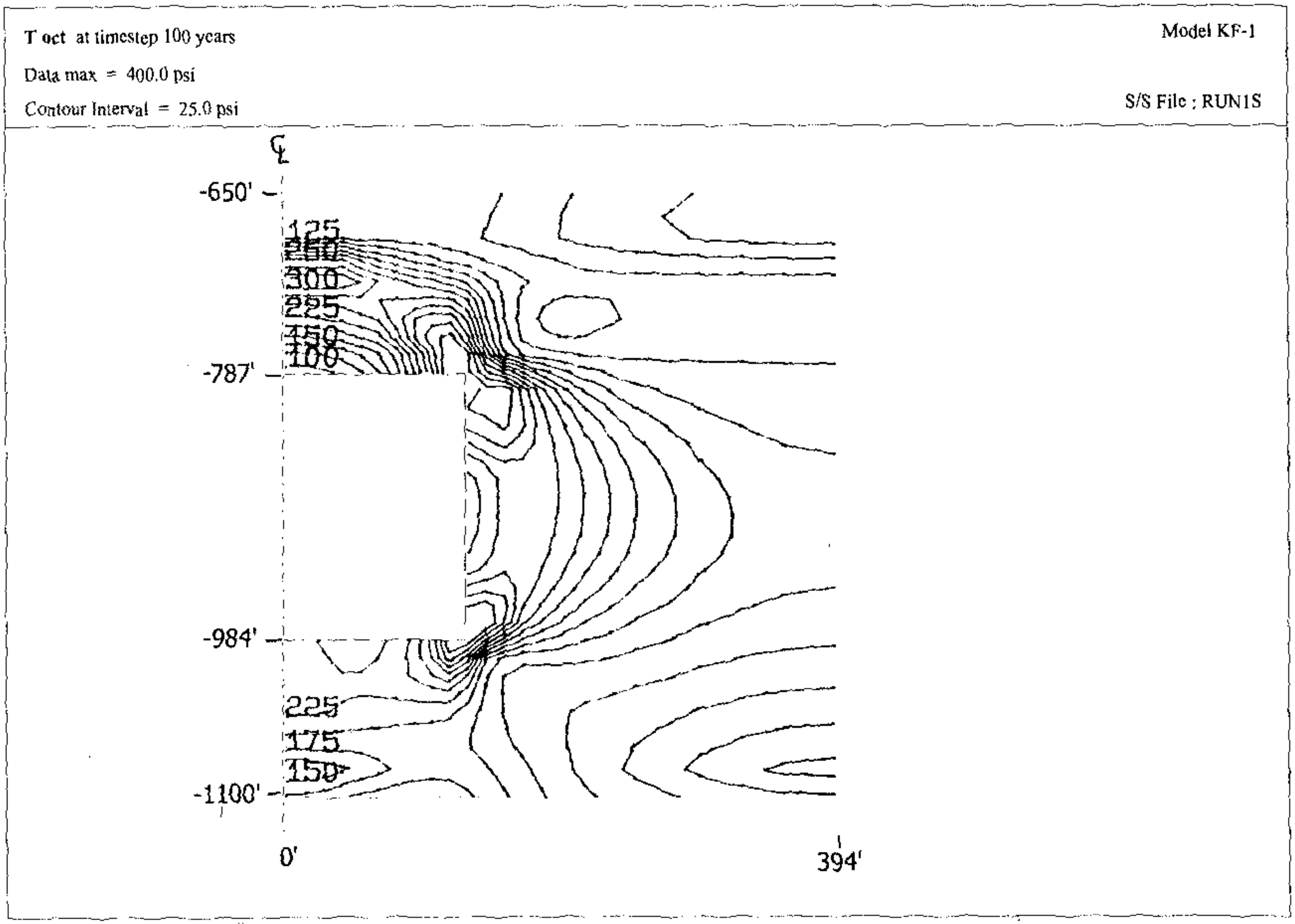
รูปที่ 39 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง WK-4



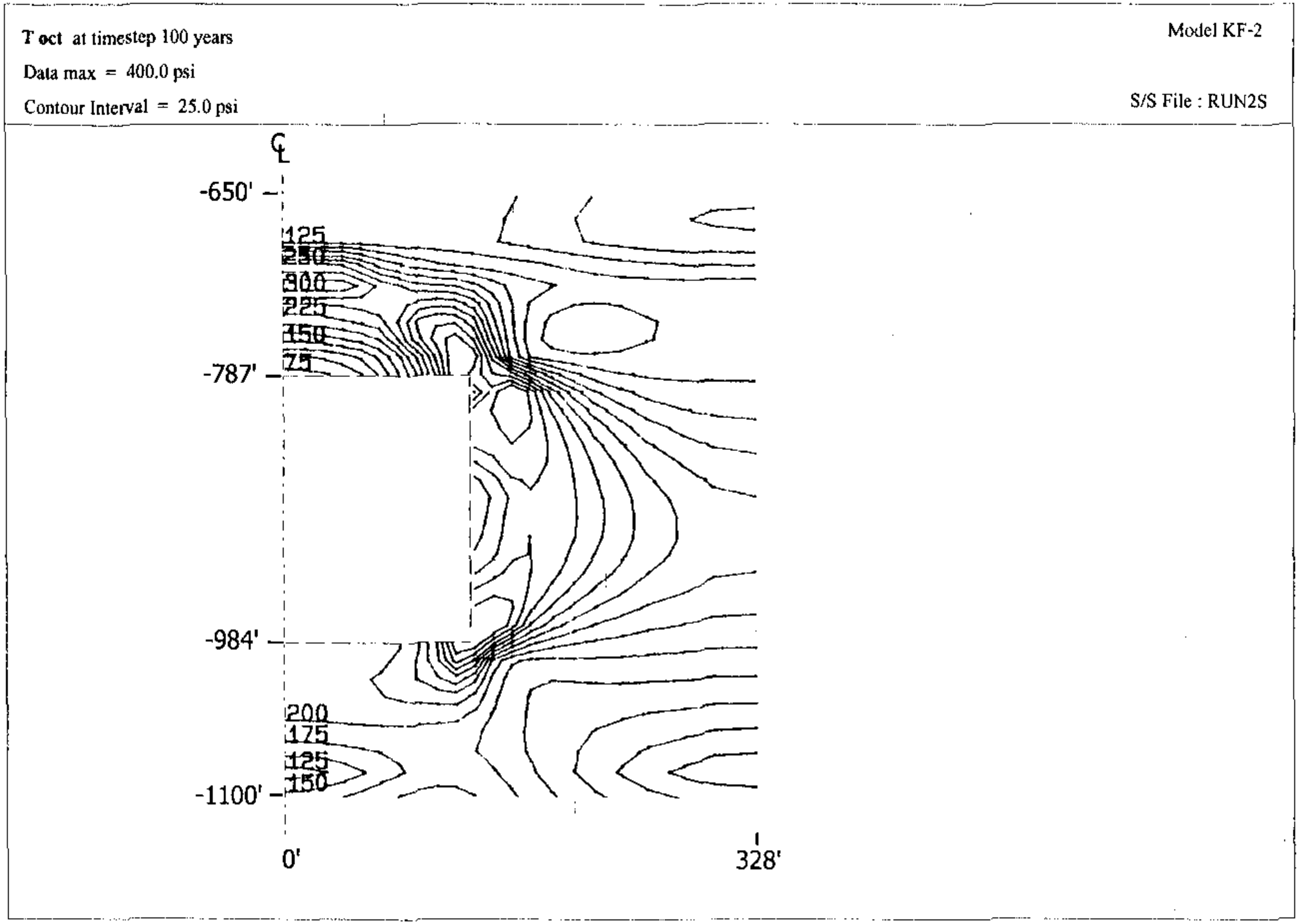
รูปที่ 40 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-1



รูปที่ 41 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KS-2



รูปที่ 42 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-1



รูปที่ 43 การกระจายของแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 100 ปี ของแบบจำลอง KF-2

ผลกระทบของความลึกในส่วนที่นำมาศึกษา (D/d = 1:2.25, 1:0.91, 1:0.23) ต่อการกระจายตัวของความเค้นในแนวเฉือนจะมีไม่มากนัก

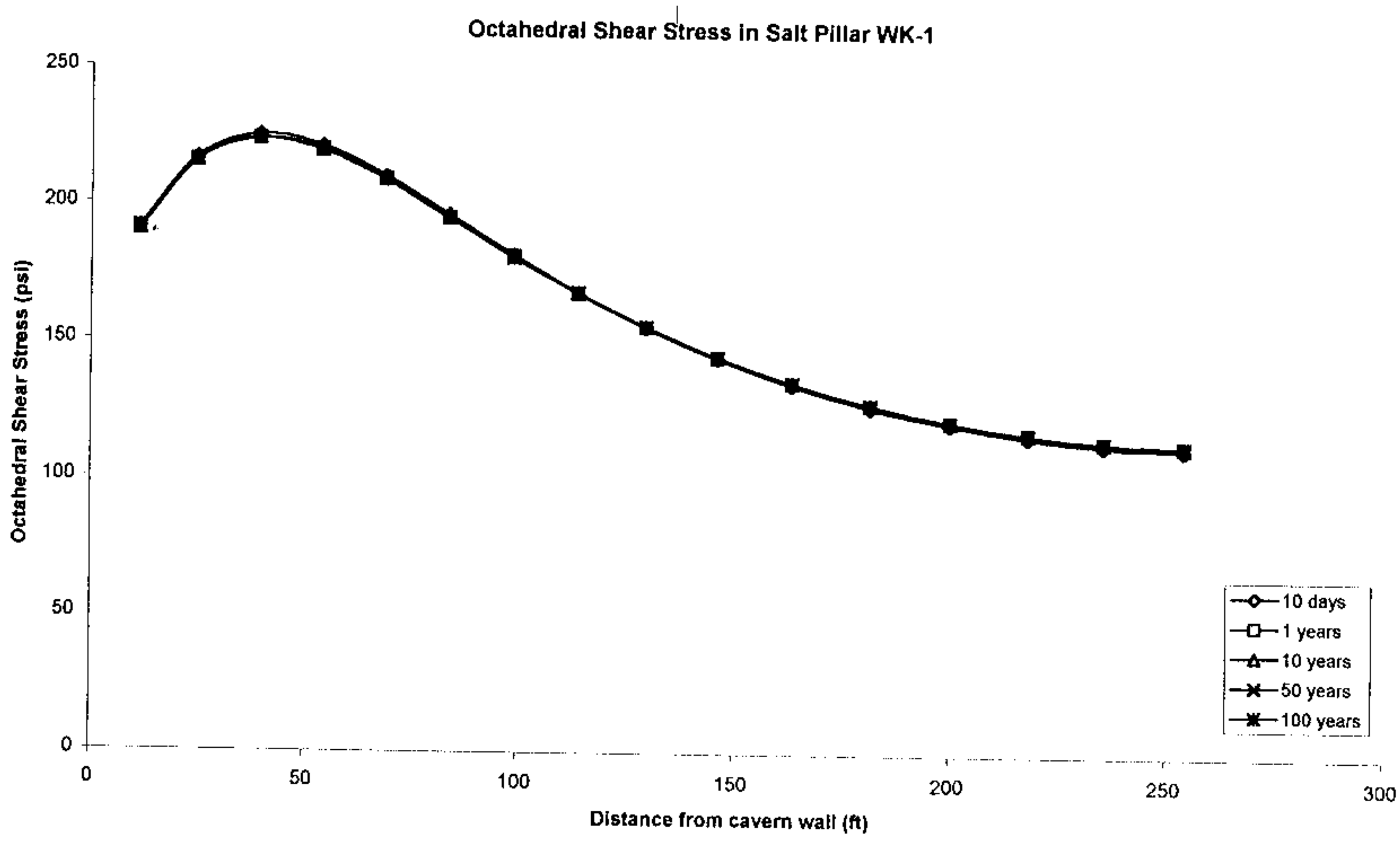
การกระจายตัวของความเค้นในแนวเฉือนจากผนังของโพรงเข้าไปในชั้นหินเกลือที่ค้ำยันและกั้นระหว่างโพรงของแบบจำลองทุกแบบได้นำมาแสดงไว้ในรูปที่ 44-51 รูปเหล่านี้แสดงแผนภูมิของแรงเฉือนของโพรงที่มีอายุต่างกัน (คืออายุ 10 วัน 1 ปี 10 ปี 50 ปี และ 100 ปี) ผลที่ได้จากการคำนวณบ่งบอกว่าเมื่อระยะห่างระหว่างโพรงลดลงแรงเฉือนจะมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ในขณะที่ถ้าระยะห่างระหว่าโพรงเพิ่มขึ้นเป็น 3:1 แรงเฉือนจะเข้าสู่ระบบสมดุล (Equilibrium) เกือบทันทีหลังจากที่โพรงได้ถูกละลายขึ้น กล่าวคือแรงเฉือนที่ 10 วัน 1 ปี 10 ปี 50 ปี และ 100 ปี จะมีค่าไม่ต่างกันเลย ส่วนรูปที่ 44 รูปที่ 46 และรูปที่ 47 จะแสดงให้เห็นผลกระทบของความลึกต่อการกระจายตัวของแรงเฉือน ซึ่งจะมีค่าสูงสุดของแรงเฉือนใกล้เคียงกันและจะสะสมตัวอยู่ใกล้กับผนังของโพรง ถ้าโพรงอยู่ตื้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนในชั้นหินเกลือก็จะมีแนวโน้มสูงขึ้น

ผลกระทบจากความลึกของโพรงต่อการทรุดตัวของผิวดินได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 52 จะเห็นได้ว่าที่แบบจำลองบ้านวังกะอาม ถ้าหลังคาของโพรงอยู่ที่ความลึก 143 และ 180 เมตร การทรุดตัวของผิวดินจะมีค่าประมาณ 4 นิ้วหรือน้อยกว่า แต่ถ้าความลึกของโพรงมีน้อยถึงระดับประมาณ 73 เมตร จะมีการทรุดตัวของผิวดินข้างบนมากถึง 2 ฟุต ในช่วง 100 ปีหลังจากโพรงได้ถูกละลาย

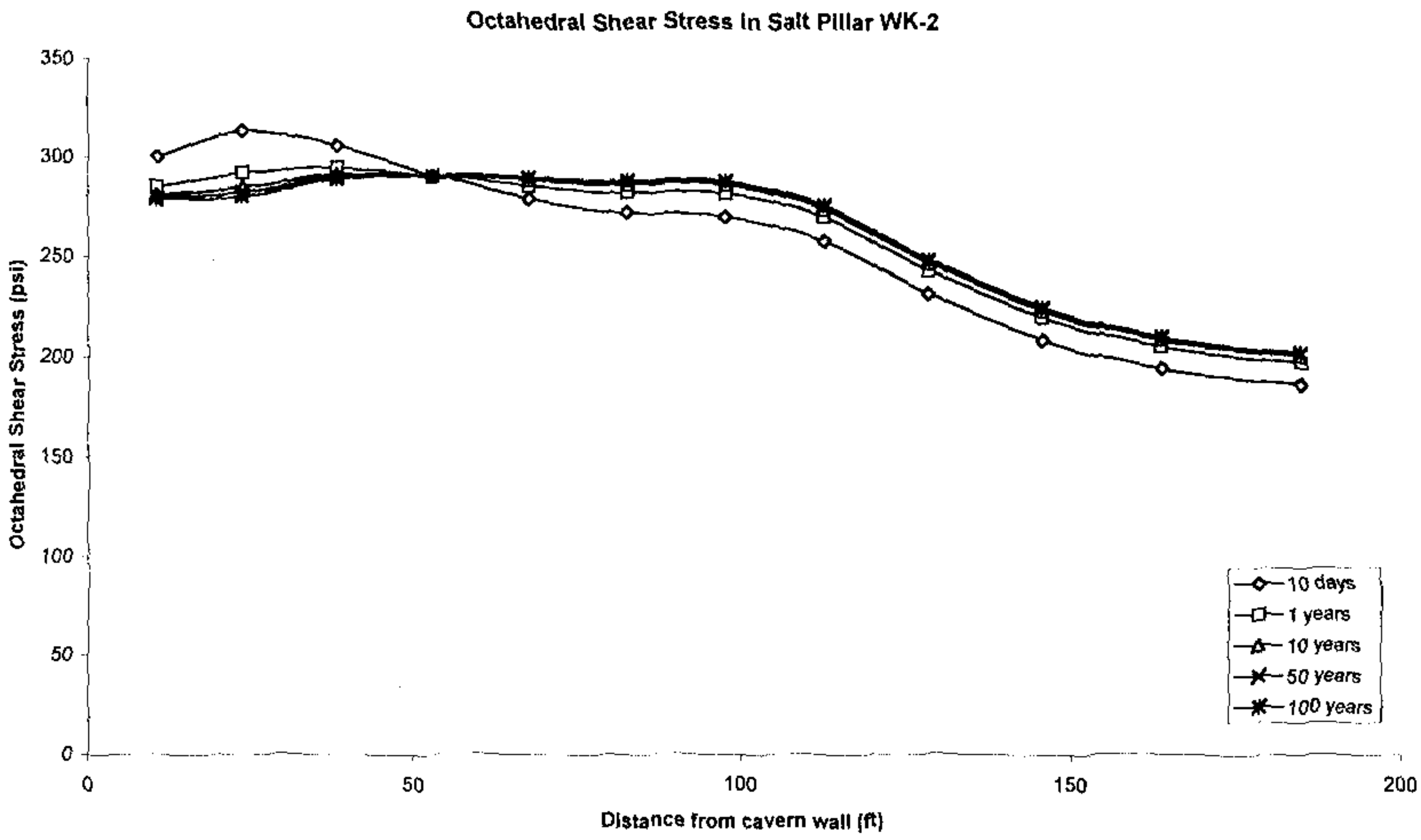
การทรุดตัวของผิวดินของแบบจำลองต่าง ๆ ได้นำมาเปรียบเทียบกันในรูปที่ 53 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าระยะห่างระหว่างโพรงลดลงจาก 3:1 เป็น 2.5:1 การทรุดตัวของผิวดินก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการทรุดตัวของผิวดินในช่วง 100 ปี หลังจากโพรงได้ถูกละลายขึ้นก็ไม่ควรจะเกิน 8 นิ้ว ปริมาณการทรุดตัวจะเกิดมากและเร็วที่สุดในช่วง 1-2 ปีแรกหลังจากโพรงได้ถูกละลายขึ้น หลังจากนั้นแล้วก็จะมีค่าคงที่ไปจนถึง 100 ปีหรือนานกว่า ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการเข้าสู่ระบบสมดุลทางด้านกลศาสตร์ของหินเกลือและหินที่วางตัวอยู่เบื้องบน

การหดตัวของโพรงในแนวดิ่งได้แสดงในเชิงเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองต่าง ๆ ในรูปที่ 54 และรูปที่ 55 ถ้าเพดานของโพรงมีระดับตื้นขึ้น (หรืออีกนัยหนึ่งชั้นเกลือของหลังคาโพรงบางลง) จะทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้นดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 54 ซึ่งเปรียบเทียบการหดตัวของแบบจำลองของบ้านวังกะอามที่ความลึกต่างกัน นอกจากนั้นแล้วการหดตัวในแนวดิ่งนี้จะมีแนวโน้มสูงถ้าระยะห่างระหว่างโพรงมีค่าลดลงดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 55

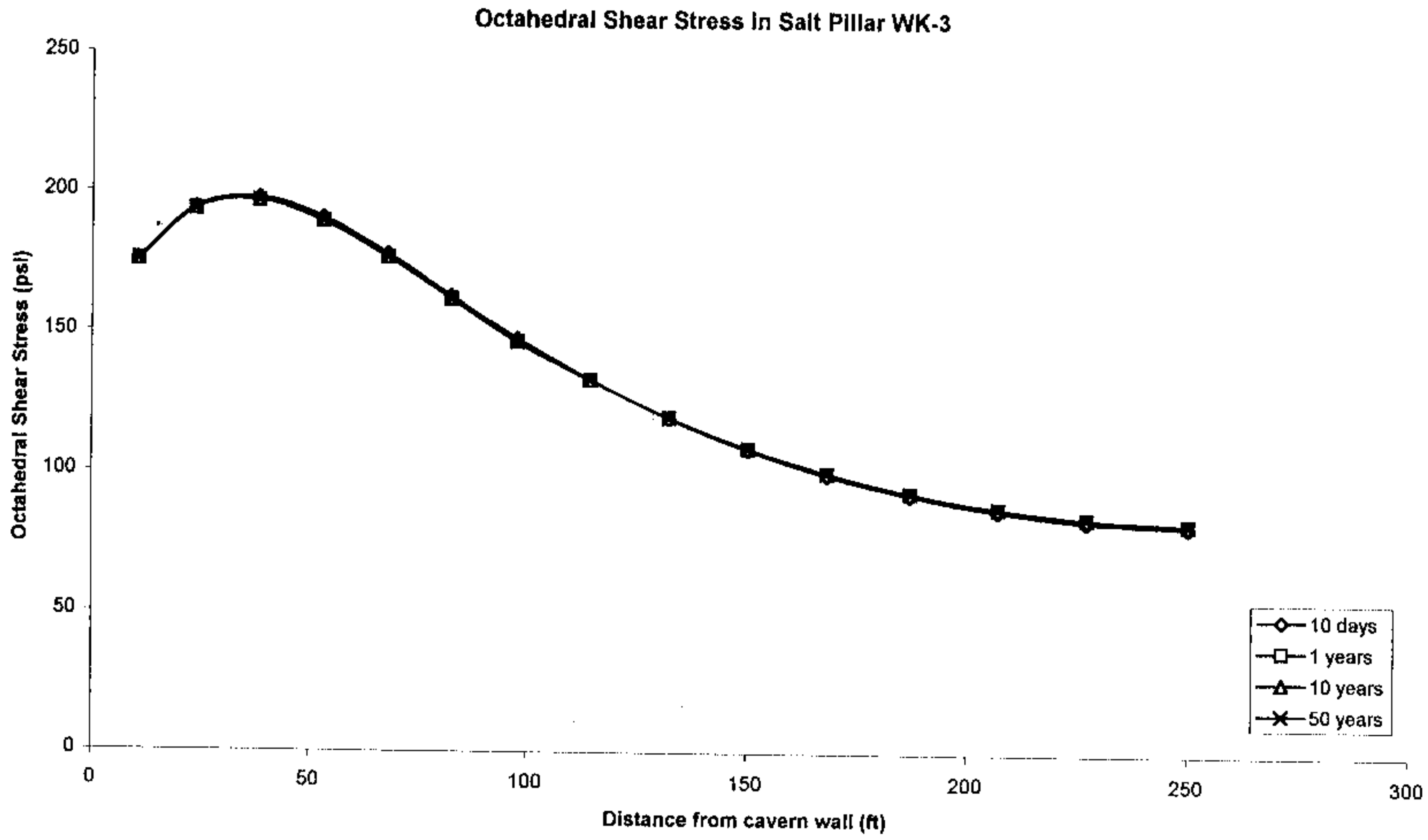
การหดตัวในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงในทุกแบบจำลองจะมีค่าน้อยกว่าการหดตัวในแนวดิ่งดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 56 และ 57 ผลการคำนวณบ่งบอกว่าการหดตัวในแนวดิ่งนี้ก็จะมีมากขึ้นเช่นกันถ้าโพรงอยู่ในระดับตื้นและมีระยะห่างระหว่างโพรงน้อย



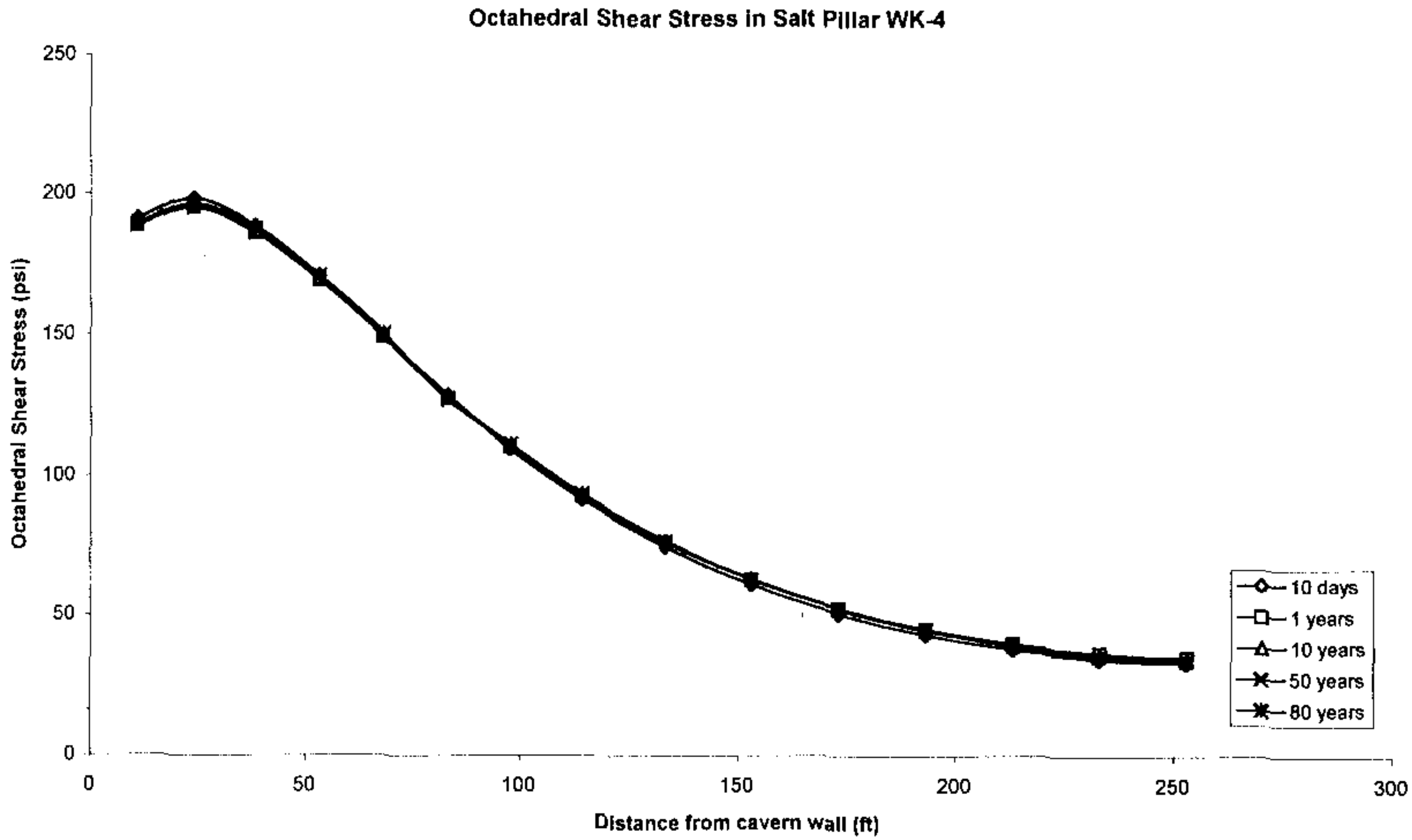
รูปที่ 44 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK-1



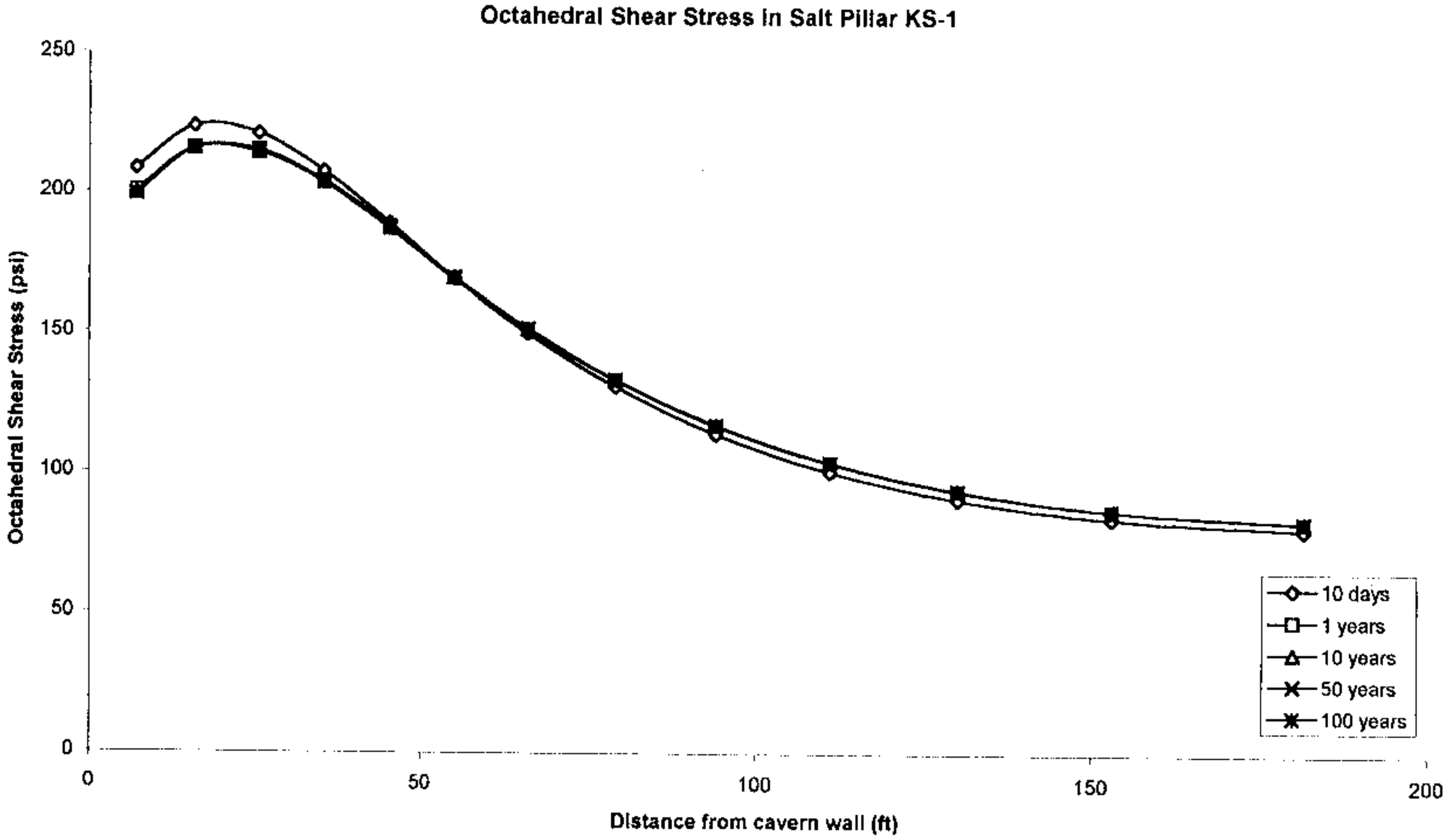
รูปที่ 45 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK-2



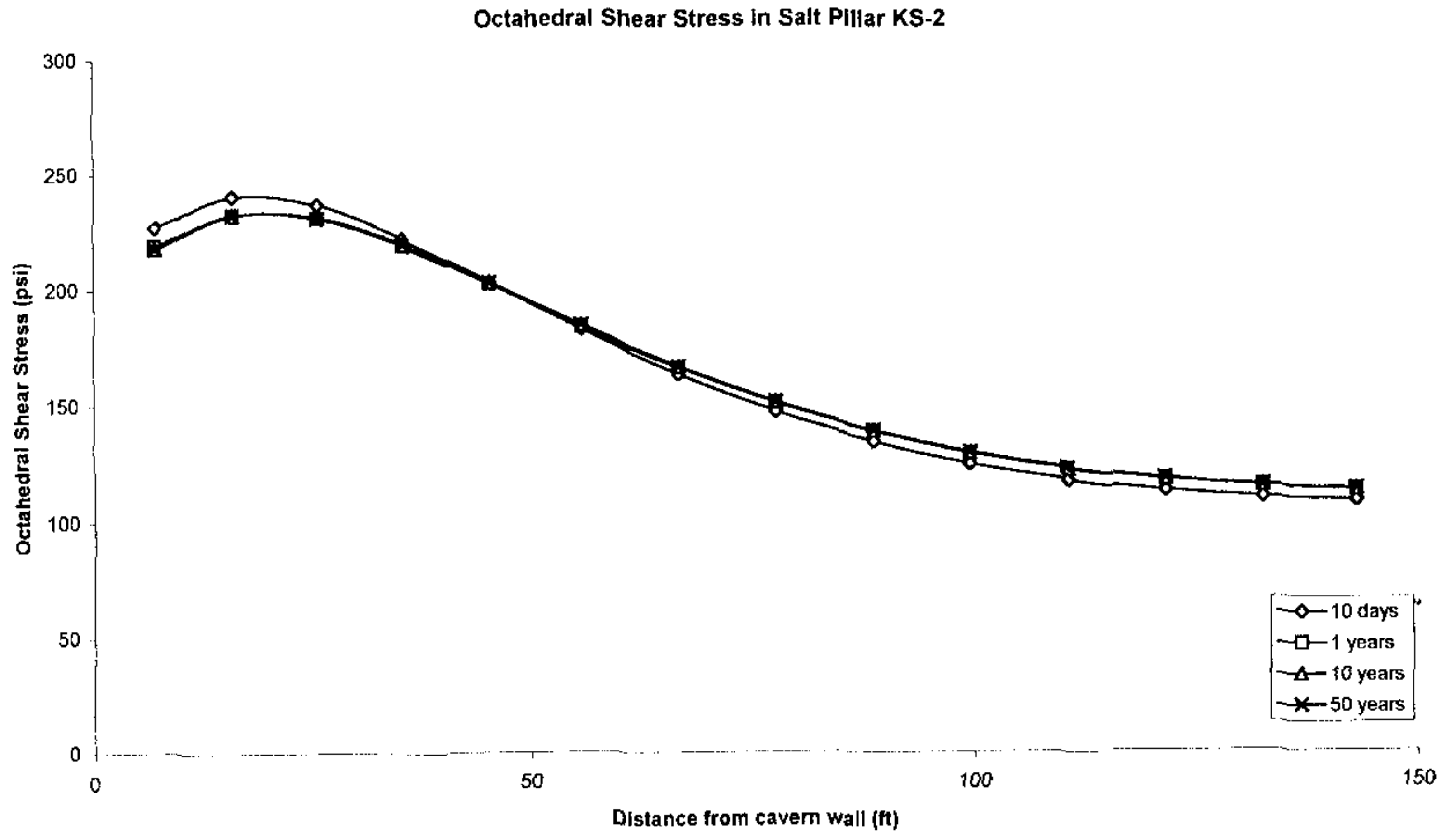
รูปที่ 46 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK-3



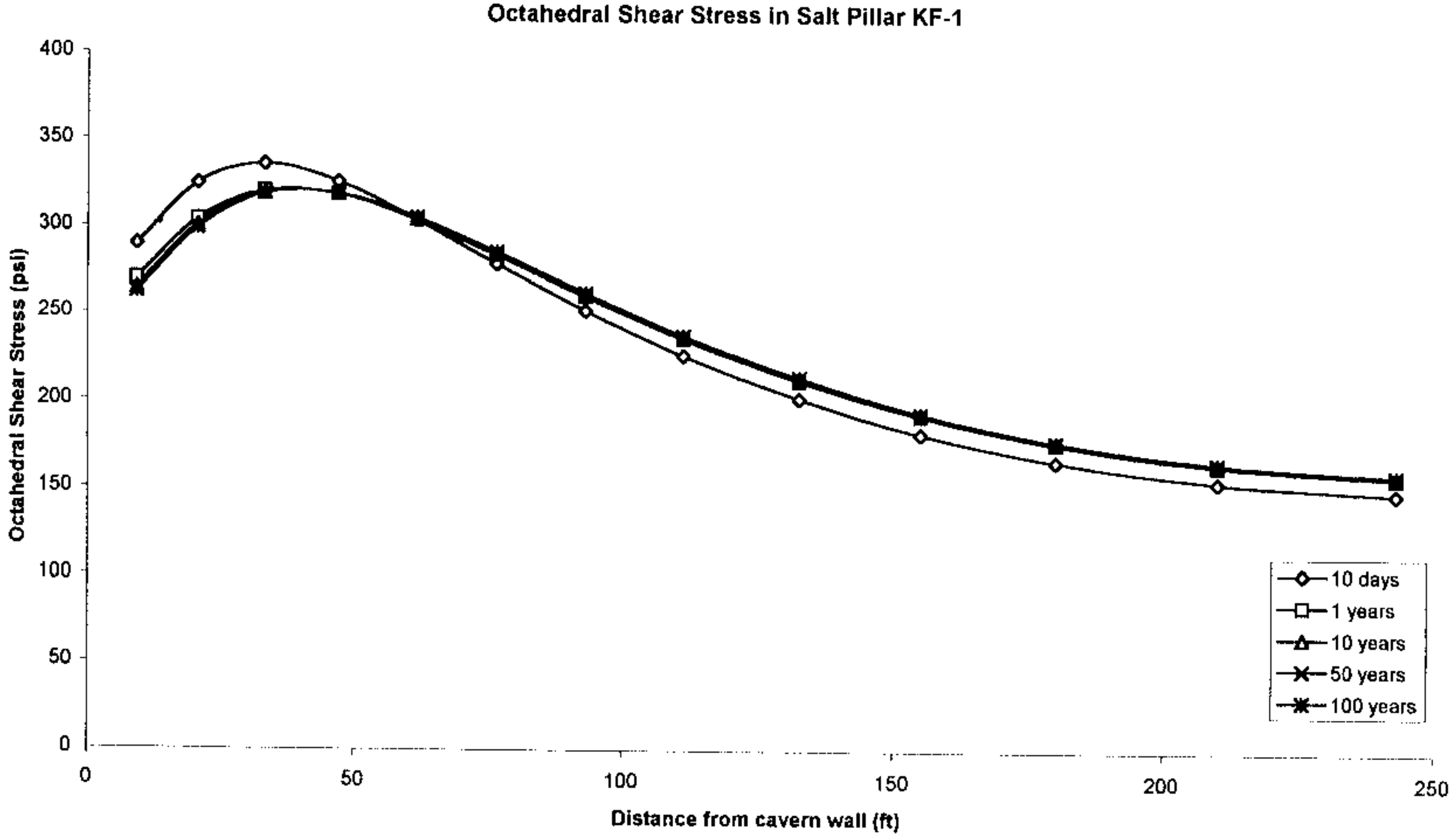
รูปที่ 47 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK-4



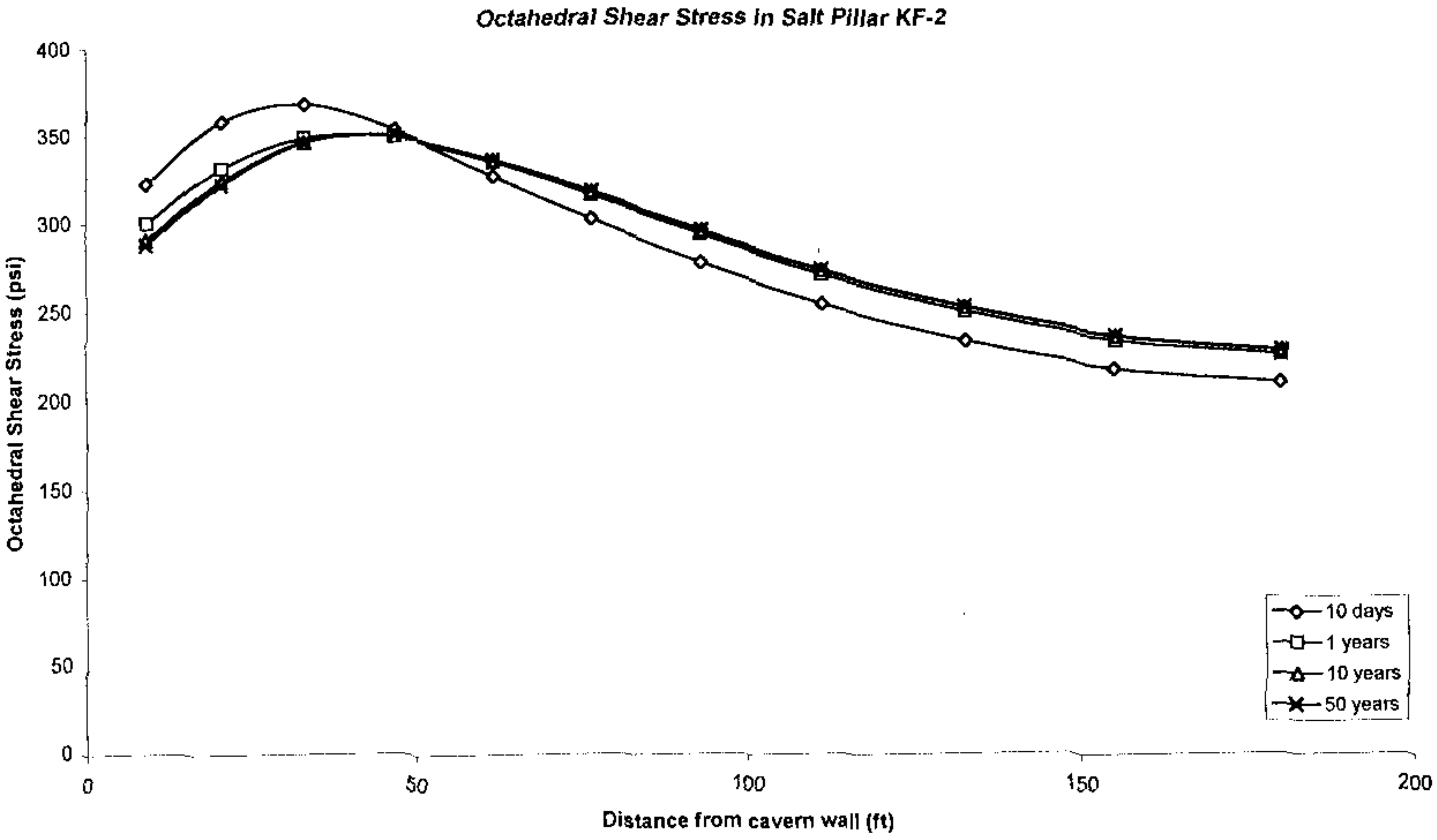
รูปที่ 48 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KS-1



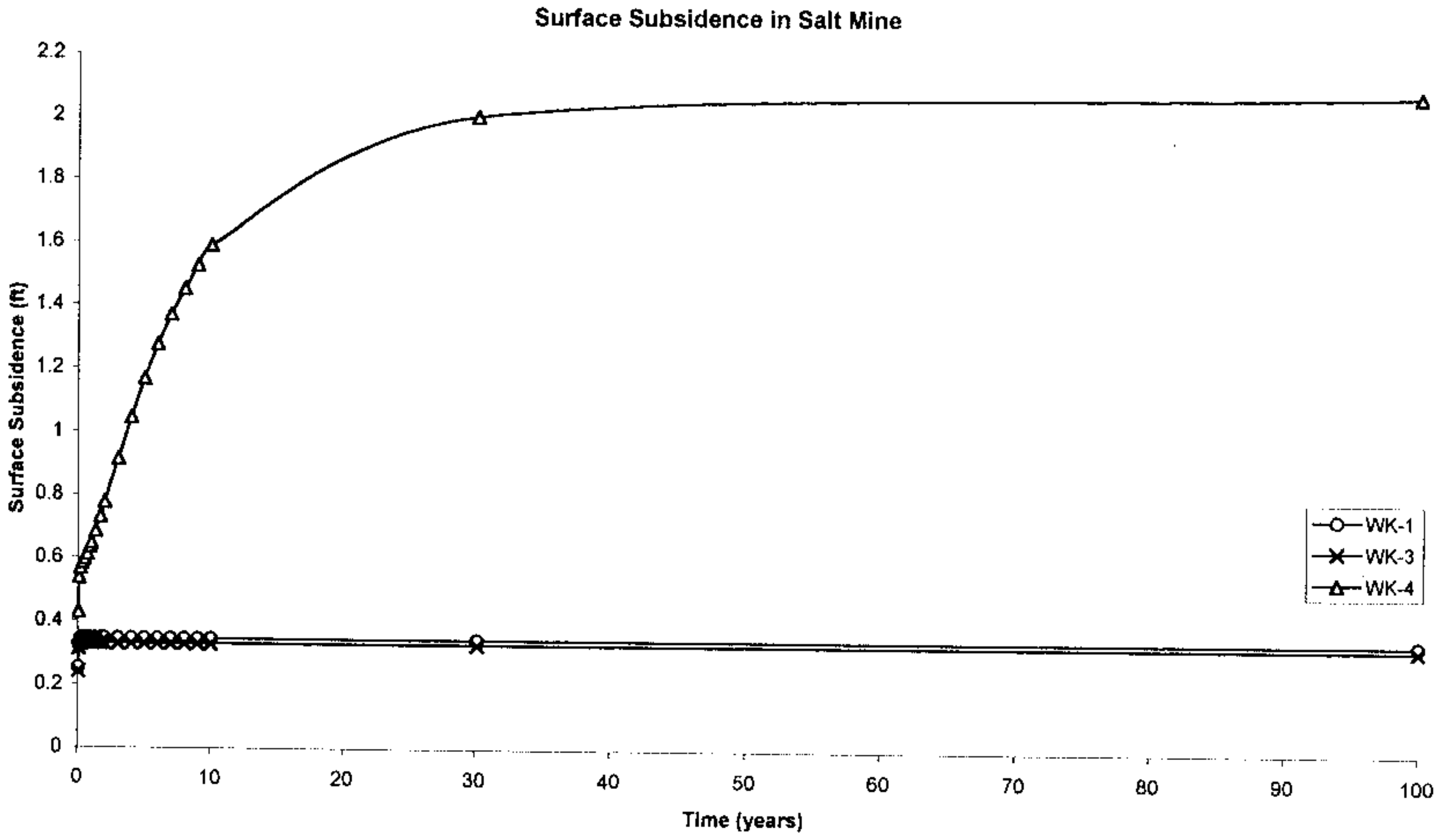
รูปที่ 49 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KS-2



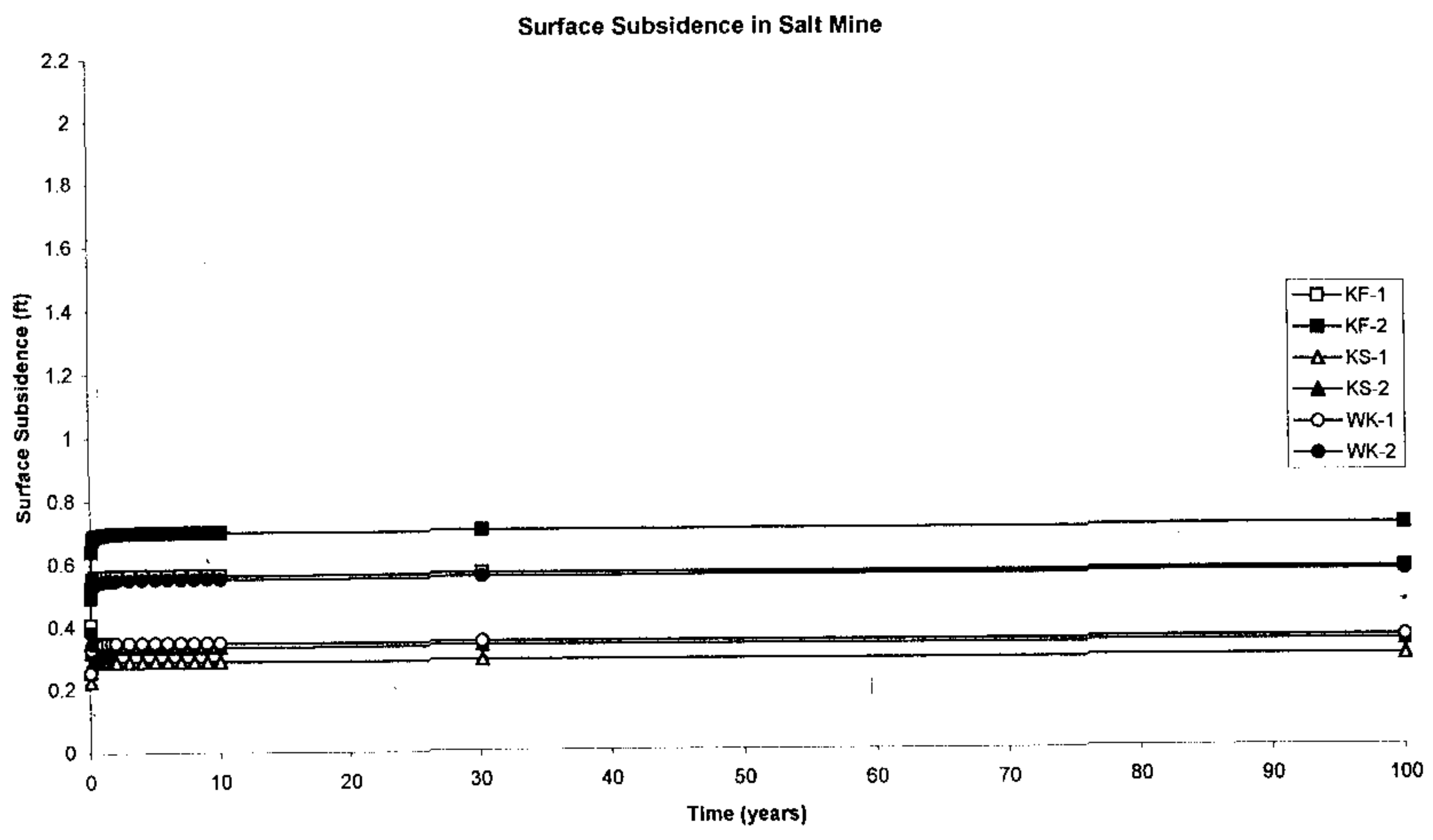
รูปที่ 50 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KF-1



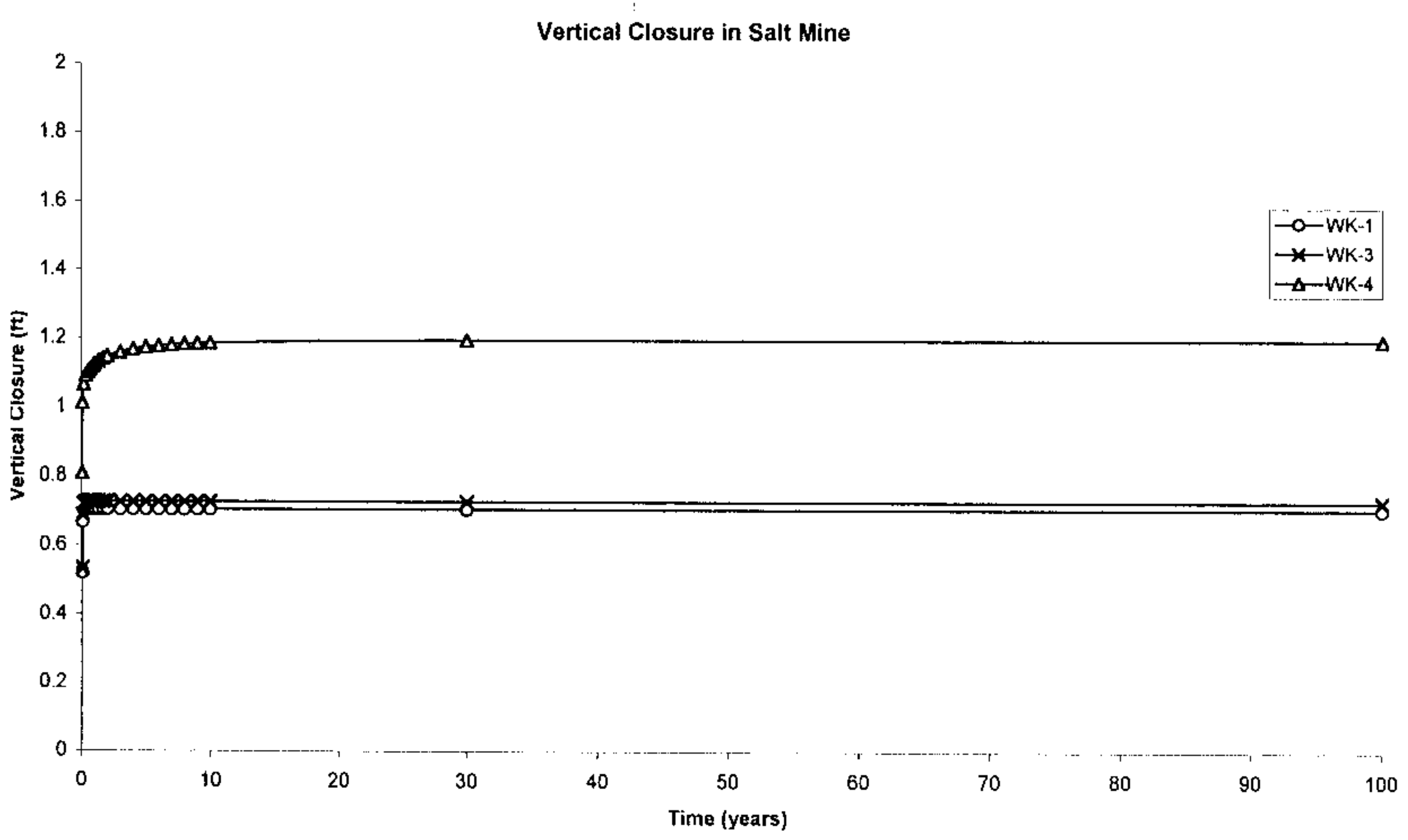
รูปที่ 51 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KF-2



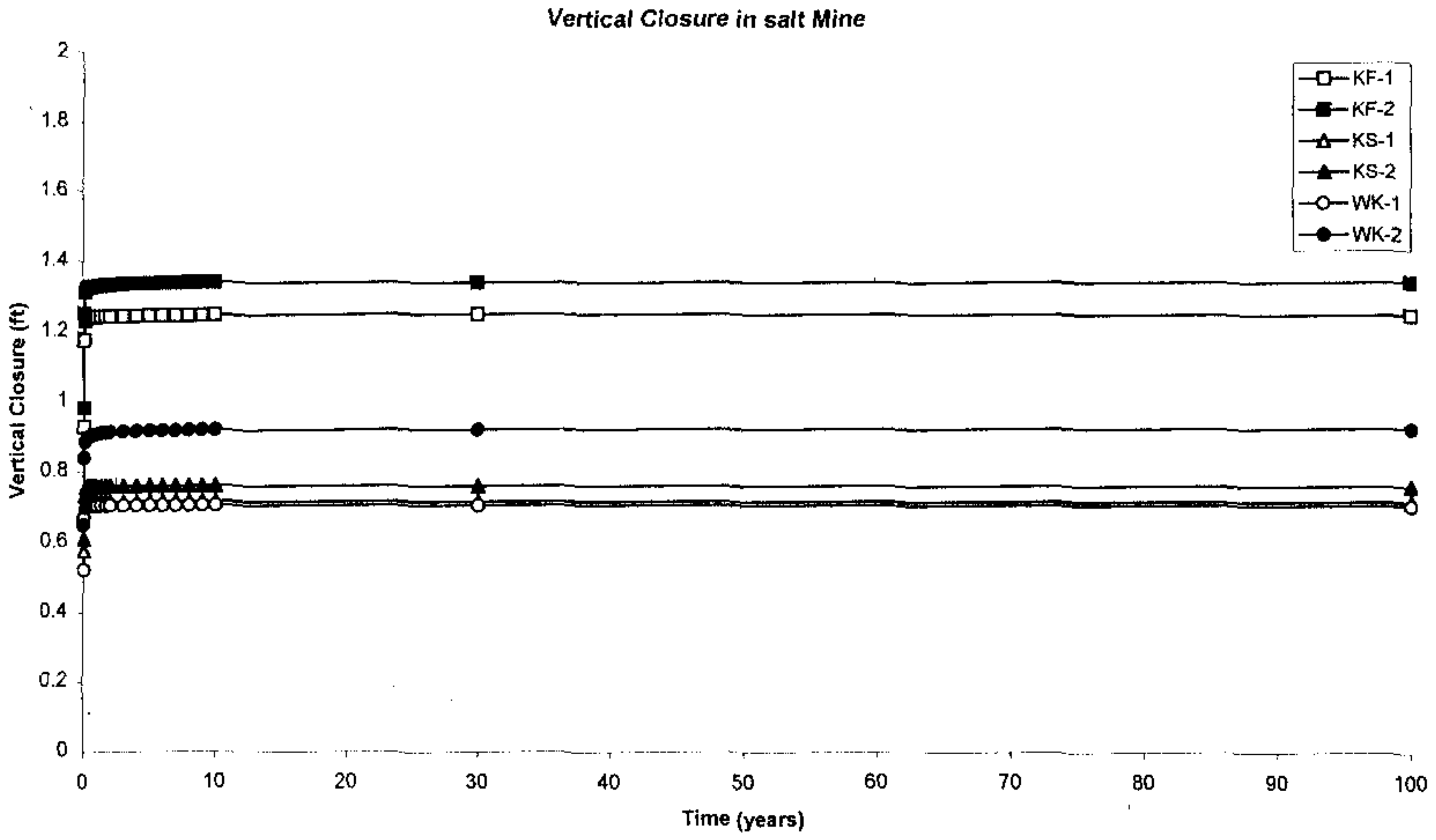
รูปที่ 52 การทรุดตัวของผิวดินสำหรับแบบจำลอง WK-1, WK-3 และ WK-4



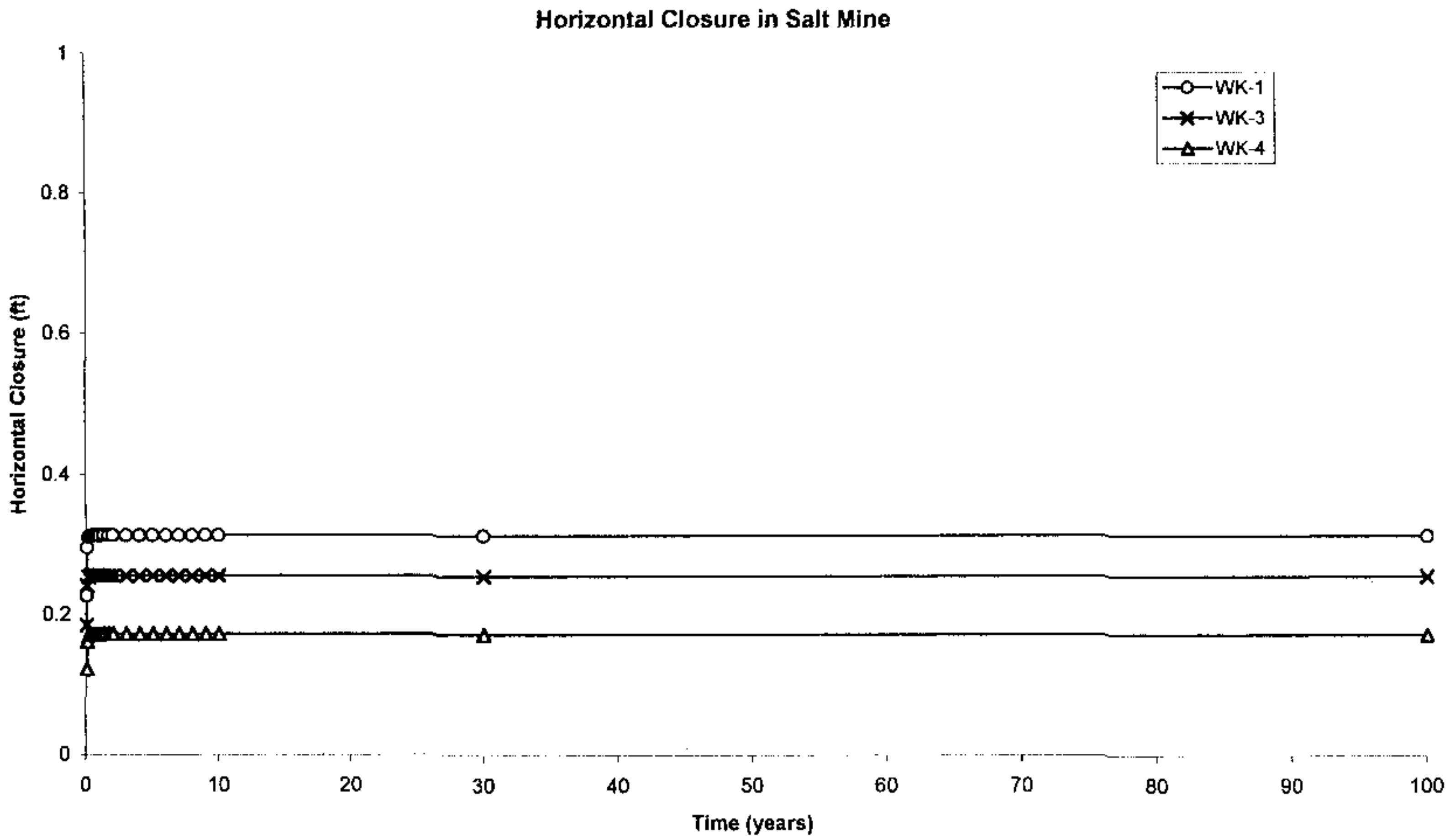
รูปที่ 53 การทรุดตัวของผิวดินสำหรับแบบจำลอง WK, KS และ KF



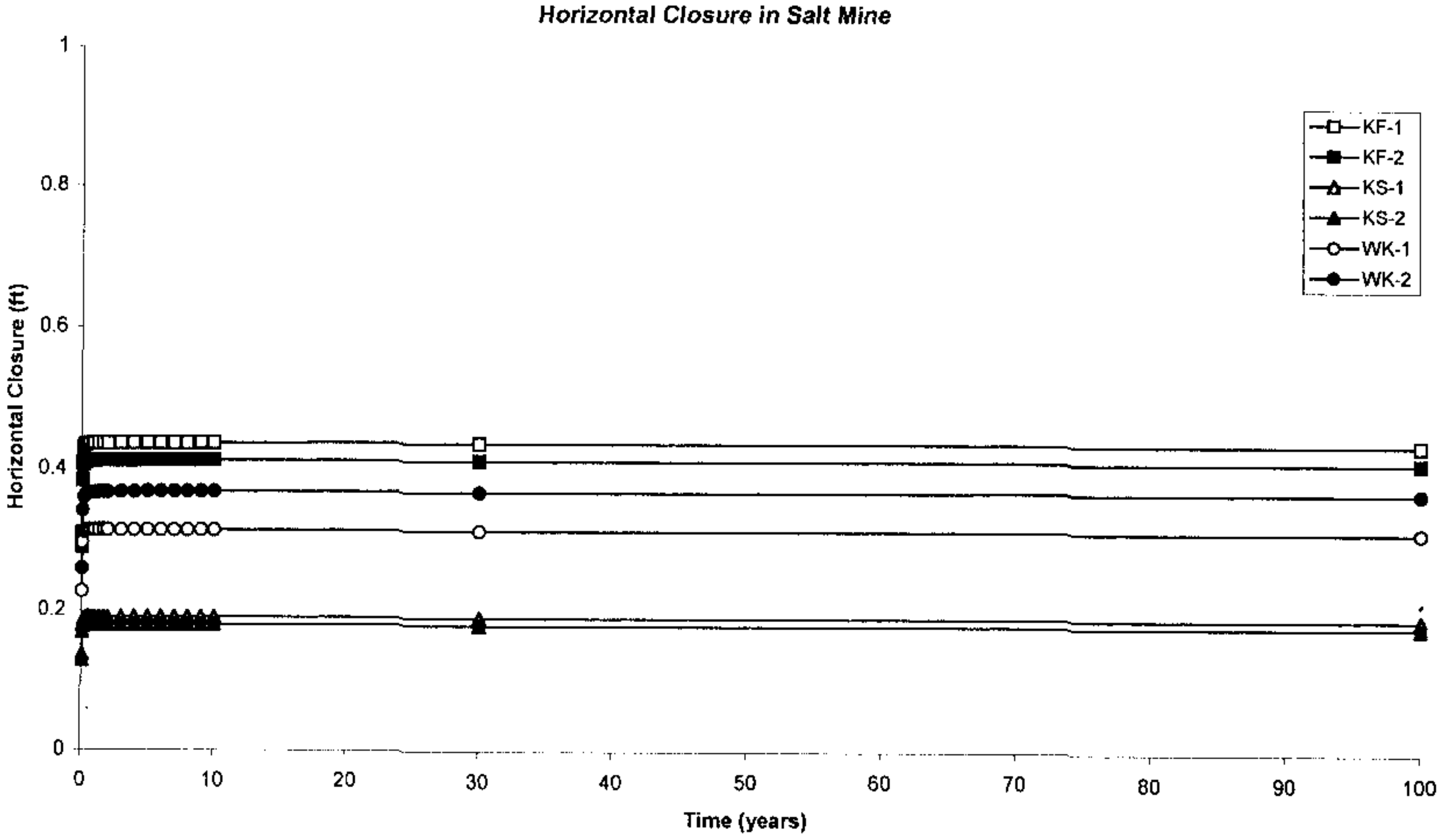
รูปที่ 54 การหดตัวในแนวดิ่งของโพรงของแบบจำลอง WK-1, WK-3 และ WK-4



รูปที่ 55 การหดตัวในแนวดิ่งของโพรงของแบบจำลอง WK, KS และ KF



รูปที่ 56 การหดตัวในแนวราบของโพรงของแบบจำลอง WK-1, WK-3 และ WK-4



รูปที่ 57 การหดตัวในแนวราบของโพรงของแบบจำลอง KF, WK และ KS

ผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่าทั้ง 8 แบบจำลอง ค่าความซึมผ่านในชั้นหินเกลือจะไม่เพิ่มขึ้น คือมีค่า Permeability อยู่ที่ 10^{-10} Darcy ตั้งแต่ก่อนละลายโพรงไปจนถึง 100 ปีของอายุของโพรง เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากว่าในการเปลี่ยนแปลงรูปในชั้นหินเกลือทุกจุดที่อยู่รอบโพรง จะเปลี่ยนรูปในรูปของ Plastic deformation ไม่ใช่เป็นแบบ Brittle deformation และอีกประการหนึ่งคือค่าเฉลี่ยของแรงดันในชั้นหินเกลือก็มีค่าสูงพอสมควร เนื่องจากความลึกของโพรงที่ได้กำหนดไว้

บทที่ 5
การวิเคราะห์ผลของการคำนวณ

การวิเคราะห์ผลของการคำนวณมีจุดประสงค์ที่จะเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ที่เป็นตัวแทนทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยความเหมาะสมนี้จะรวมไปถึง

1. โพรงจะต้องมีเสถียรภาพทางกลศาสตร์สูงและในระยะยาวกว่า 100 ปี
2. มีการทรุดตัวของผิวดินน้อยที่สุด หรือไม่ควรเกิน 1 ฟุตในช่วง 100 ปี
3. ไม่มีการรั่วซึมระหว่างโพรง กล่าวคือ ความซึมผ่านในชั้นหินเกลือจะต้องไม่เพิ่มขึ้นจากค่าที่ต่ำที่อยู่ตามธรรมชาติก่อนที่จะสร้างโพรงขึ้น
4. มีการหดตัวของโพรงเนื่องจาก Creep Deformation น้อยที่สุด
5. แต่ละโพรงควรจะอยู่ใกล้กันเท่าที่จะทำได้เพื่อเพิ่มผลผลิตของปริมาณเกลือสินเธาว์ต่อพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร

จากหลักเกณฑ์ข้างต้นผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลของการคำนวณที่เสนอในบทที่ 4 และให้ประกอบกับเหตุผลอธิบายถึงการคัดเลือกข้อกำหนดของการออกแบบที่เหมาะสมของแบบจำลองใน 3 พื้นที่

ในพื้นที่ที่บ้านวังกะอาม (Model WK) ส่วนบนของชั้นหินเกลืออยู่ที่ความลึก 180 เมตร และจะมีชั้นหินดินดานวางทับอยู่ข้างบน ชั้นหินดินดานนี้จะมีค่า Shear modulus และค่า Bulk modulus ต่ำมาก (ประมาณ 1 ใน 10 ของชั้นหินเกลือ) ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 1 ดังนั้นเมื่อความลึกของโพรงลดลงจากระดับความลึก 180 เมตร มาอยู่ที่ระดับความลึก 73 เมตร จะทำให้หลังคาของโพรงมีเสถียรภาพต่ำลงถึงจุดที่อาจเกิดการพังทะลายลงได้ และจะทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินมากขึ้น ดังนั้นโพรงที่จะทำการละลายในพื้นที่ที่บ้านวังกะอามควรจะมีความลึกอย่างน้อย 142 เมตร และเพื่อให้เสถียรภาพสูงขึ้น ความลึกของโพรงอาจจะลงไปอยู่ที่ 180 เมตร ในขณะเดียวกันเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงไม่ควรเกิน 80 เมตร ความสูงของโพรงไม่ควรเกิน 60 เมตร ทั้งนี้เพื่อเหลือชั้นหินเกลือที่หนาอย่างน้อย 30 เมตร ไว้ใต้พื้นของโพรงเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเค็มในโพรงรั่วซึมลงไปในชั้นหินทรายที่อยู่ข้างล่าง นอกจากนั้นแล้วในพื้นที่ที่บ้านวังกะอามนี้ระยะห่างระหว่างโพรงไม่ควรน้อยกว่า 240 เมตร ถ้าระยะห่างระหว่างโพรงลดลงชั้นหินเกลือที่กั้นระหว่างโพรงซึ่งจะรองรับน้ำหนักของชั้นหินข้างบนทั้งหมด (Overburden) จะต้องรับน้ำหนักมากซึ่งจะทำให้หินเกลือที่อยู่ใกล้ผนังของโพรงมีเสถียรภาพต่ำลง และจะทำให้มีการหดตัวของโพรงสูงขึ้น

ในพื้นที่ที่บ้านโคกแฝก (Model KF) จะมีชั้นหินเกลืออยู่ 2 ชั้น ทั้ง 2 ชั้นนี้จะคั่นด้วยชั้นหินดินดานซึ่งมีความหนาประมาณ 50 เมตร หินเกลือชั้นบนจะอยู่ในระดับความลึก 90 เมตร ส่วน

หินเกลือชั้นล่างจะอยู่ที่ระดับความลึก 250 เมตร เนื่องจากชั้นหินเกลือข้างบนอยู่ในระดับตื้นเกินไป การที่จะละลายโพรงขนาดใหญ่ให้เหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจอาจจะทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินอย่างรุนแรงและอาจจะทำให้เกิดการพังทะลายของโพรงได้ การที่เลือกละลายโพรงในชั้นหินเกลือชั้นล่างนี้จะทำให้เสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของโพรงมีค่าสูงขึ้น มีการทรุดตัวของผิวดินน้อยลงและจะทำให้เหมาะสมทางด้านเศรษฐกิจ ดังนั้นหลังคาของโพรงควรจะอยู่ที่ความลึก 270 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงไม่ควรเกิน 80 เมตร ความสูงของโพรงไม่เกิน 60 เมตร ทั้งนี้เพื่อเหลือชั้นหินเกลือที่หนาประมาณ 30 เมตร เอาไว้ด้านล่างของโพรงเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำเค็มในโพรงลงไปถึงชั้นหินทรายที่อยู่ด้านล่างของโพรง ระยะห่างระหว่างโพรง (วัดจากจุดศูนย์กลาง) ไม่ควรต่ำกว่า 240 เมตร

ในพื้นที่ที่บ้านโกกสว่าง (Model KS) มีชั้นหินเกลือ 2 ชั้นเช่นเดียวกัน ทั้ง 2 ชั้นนี้จะอยู่ในระดับตื้นและบางกว่าหินเกลือที่บ้านโกกแฝก ด้วยเหตุผลเดียวกันโพรงควรจะถูกละลายในชั้นหินเกลือชั้นล่าง หลังคาของโพรงควรจะอยู่ที่ความลึกประมาณ 140 เมตร ความสูงของโพรงไม่ควรเกิน 40 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงควรอยู่ที่ 60 เมตร ระยะห่างระหว่างโพรงควรอยู่ระหว่าง 150-180 เมตร

จากการกำหนดค่าการออกแบบบางค่าดังกล่าวข้างต้นผลที่ได้รับคือ โพรงจะมีเสถียรภาพสูงที่สุดทั้งทางด้านกลศาสตร์ ขนาดของโพรงก็จะเหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจ การที่จะเพิ่ม Extraction ratio ให้สูงกว่านี้อาจจะทำให้เสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของโพรงต่ำลง ข้อแนะนำทางด้านการออกแบบดังกล่าวข้างต้นจะทำให้หินเกลือเข้าสู่ระบบสมดุลเร็วที่สุดหลังจากที่โพรงได้ถูกละลายขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในชั้นหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงน้อยที่สุด

ผู้วิจัยขอเน้นในที่นี้ว่าผลที่ได้รับจากการคำนวณและข้อแนะนำทางด้านการออกแบบดังกล่าวข้างต้นจะต้องตั้งอยู่บนสมมติฐานหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น ชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงจะต้องมีลักษณะสมบูรณ์ ไม่มีโพรง รอยแตก หรือการผุพัง ชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงต้องอยู่ในแนวราบ ไม่มีการขุดเจาะมาก่อน และจะไม่มีการขุดเจาะเพิ่มเติมหลังจากที่ได้ทำการละลายโพรงตามที่แนะนำไปแล้ว โพรงที่จะทำการละลายต้องมีขนาดและรูปร่างทางเรขาคณิตดังที่ได้เสนอไว้ กล่าวคือจะต้องเป็นรูปทรงกระบอกในแนวตั้ง แรงดันของน้ำเกลือในโพรงก็จะต้องเท่ากับน้ำหนักของน้ำเกลือที่มีระดับสูงถึงพื้นผิวดินด้านบน นอกจากนั้นแล้วควรตระหนักว่าผลที่ได้รับจากการคำนวณยังขึ้นกับข้อสมมติฐานและขอบเขตของการวิจัยอื่นดังที่ได้เสนอไว้ในบทต้น ๆ

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการทำเหมืองเกลือโดยวิธีละลายที่ได้มาตรฐานสากล เพื่อประยุกต์ใช้ในชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วย การศึกษาได้มุ่งไปที่การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินเสถียรภาพและคาดคะเนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องไปจนถึง 100 ปีข้างหน้าหลังจากที่โพรงได้ถูกละลายขึ้น ชั้นหินเกลือในจังหวัดชัยภูมิใน 3 พื้นที่ตัวแทนได้เลือกขึ้นมาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ คือ พื้นที่บ้านโคกแฝก บ้านวังกะอาม และบ้านโคกสว่าง ผลที่ได้จากการคำนวณและการวิเคราะห์สามารถสรุปในเชิงการออกแบบรูปร่างของโพรงดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4

การวิจัยนี้ได้อาศัยข้อมูลบางส่วนทางด้าน Creep Properties ของหินเกลือจากต่างประเทศ (สหรัฐอเมริกา แคนาดา และเยอรมันนี) เนื่องจากว่าการทดสอบเพื่อหาค่า Creep Properties ยังมิได้มีการทำในหินเกลือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยอาจจะเนื่องมาจากจะต้องมีการลงทุนสูง ดังนั้นความแม่นยำของข้อสรุปของโครงการนี้จะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ถ้ามีข้อมูลเพิ่มเติมทางด้าน Creep ของหินเกลือ และเพื่อปรับปรุงผลการวิจัยนี้ให้ถูกต้องและแม่นยำขึ้นควรจะมีการวัดและตรวจสอบทางภาคสนามเป็นการวัดการทรุดตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงในหินเกลือที่มีขนาดและการวางตัว (Layout) คล้ายคลึงกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้อาจจะขยายผลไปถึงการออกแบบโพรงในหินเกลือในรูปอื่นนอกเหนือกับรูปทรงกระบอกที่ใช้อยู่ในงานวิจัยนี้ เพื่อให้มีความหลากหลายในการออกแบบ การเปลี่ยนตัวแปรนี้อาจจะรวมไปถึงขนาด (เส้นผ่าศูนย์กลาง) ของโพรง ความลึก แรงดันในโพรง และอุณหภูมิของโพรงในชั้นหินเกลือ หรือการเลือกใช้ชั้นหินเกลือที่บริเวณอื่นที่มีความลึกและความหนาต่างไปจากที่ใช้อยู่ในงานวิจัยนี้ เป็นต้น

ตารางที่ 4 : ข้อเสนอแนะในการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ

Model	พื้นที่	เส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)	ความลึกของโพรง (เมตร)	ความสูงของโพรง (เมตร)	ระยะห่างระหว่างโพรง (เมตร)	Extraction Ratio (m^3/km^2)
WK	บ้านวังกะอาม บ้านหัวบึง วัดโพธิ์ตาล	80	180	60	240	5.23×10^6
KF	บ้านโคกแฝก วัดหัวทะเล วัดสามัคคีธรรม	80	240	60	240	5.23×10^6
KS	บ้านโคกสว่าง บ้านบึงทะเล	60	140	40	150	5.03×10^6

บรรณานุกรม

ปกรณ์ สุวานิช, (2521), แร่โปแตชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย, *เอกสารเศรษฐธรณีวิทยา เล่มที่ 22*, กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.

Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1992, "Finite Element Model to Predict Permeability Increase around Salt Cavern," SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, October 19-22, Houston, Texas, 34 pp.

Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1992, "Geohydrological Integrity of CAES in Rock Salt," *Compressed-Air Energy Storage: Proceedings of the Second International Conference*, Electric Power Research Institute, July 7-9, San Francisco, California, pp. 4.1-4.21.

Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1994, "Dilation-Induced Permeability Increase around Caverns in Rock Salt," *Proc. 1st North American Rock Mechanics Symposium*, University of Texas at Austin, June 1-3, pp. 648-656.

Hansen, F.D., K.D. Mellegard and P.E. Senseny, 1984, "Elasticity and Strength of Ten Natural Rock Salts," First Conference on Mechanical Behavior of Salt, November 9-11, Trans Tech Publications, Germany, pp. 71-83.

Japakasetr, T. and P. Suwanich, (1977), *Potash and Rock Salt in Thailand*, Economic Geology Division, DMR, Bangkok, Thailand, pp. A1-A252.

Japan International Cooperation Agency, 1981, "Evaluation Study Report for ASEAN Rock Salt-Soda Ash Project in the Kingdom of Thailand," Tokyo, Japan.

Serata S. and K. Fuenkajorn, 1992, "Formulation of A Constitutive Equation for Salt," *Proc. Seventh International Symposium on Salt*, April 6-9, Kyoto, Japan, published by Elsevier Science Publishers, B.V, Amsterdam, Vol. 1, pp. 483-488.

Serata, S. and K. Fuenkajorn, 1992, "Finite Element Program 'GEO' for Modeling Brittle-Ductile Deterioration of Aging Earth Structures," SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, October 19-22, Houston, Texas, 24 pp.

Stormont, J.C. and K. Fuenkajorn, 1994, "Dilation-Induced Permeability Changes in Rock Salt," *Proc. 8th International Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics,* Morgantown, West Virginia, May 22-28, pp. 1296-1273.

Suwanapal, A., 1992, "Potash Mine : A Co-operative Project Among ASEAN Countries and Private Sectors," National Conference on Geologic Resources of Thailand : Potential for Future Development," November 17-24, DMR, Bangkok, Thailand.

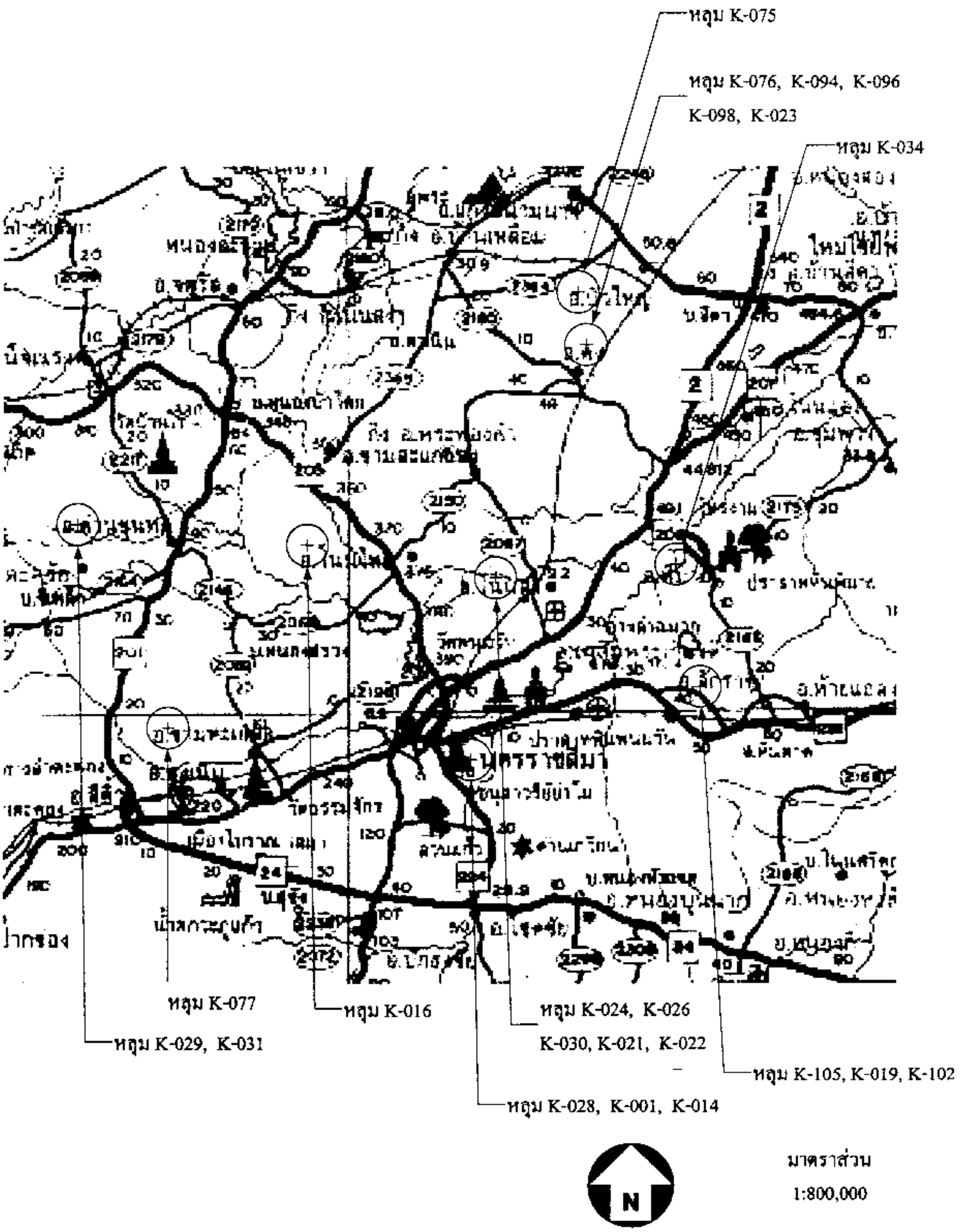
Suwanich, P. and P. Ratanajaruraks, 1982, *Sequences of Rock Salt and Potash in Thailand*, Nonmetallic Minerals Bulletin No. 1, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok.

Suwanich, P., P. Ratanajaruraks and P. Kunawat, 1982, "Core Log Bamnet Narong Area Chaiyaphum Province." Economic Geology Division, DMR, Bangkok, Thailand.

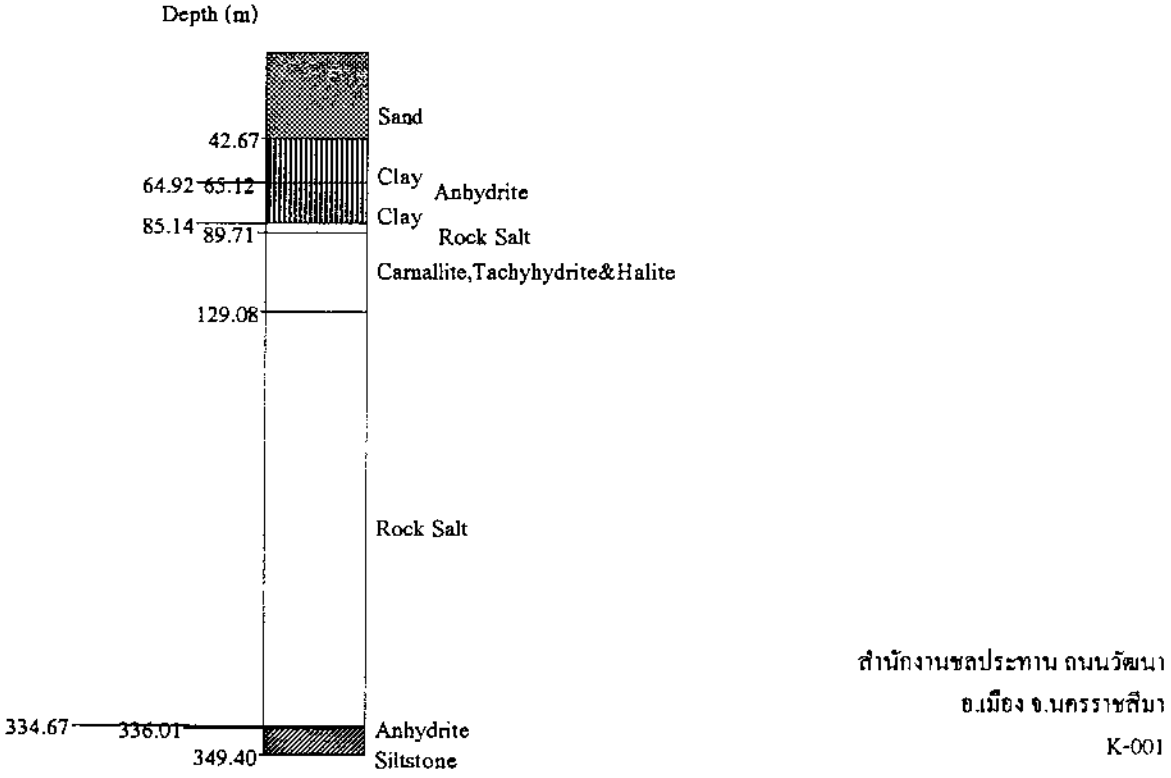
Yumuang, S., *1995, Potash Ore Researve Evaluation of* Bamnet Narong Area, Northeast Thailand, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.

Yumuang, S., C. Khantaprab and M. Taiyagupt, 1986, "The Evaporite Deposits in Bamnet Narong Area, Northeastern Thailand," GEOSEA V Proceedings, Vol. II, Geological Society of Malaysia, Bulletin 20, August, pp. 249-267.

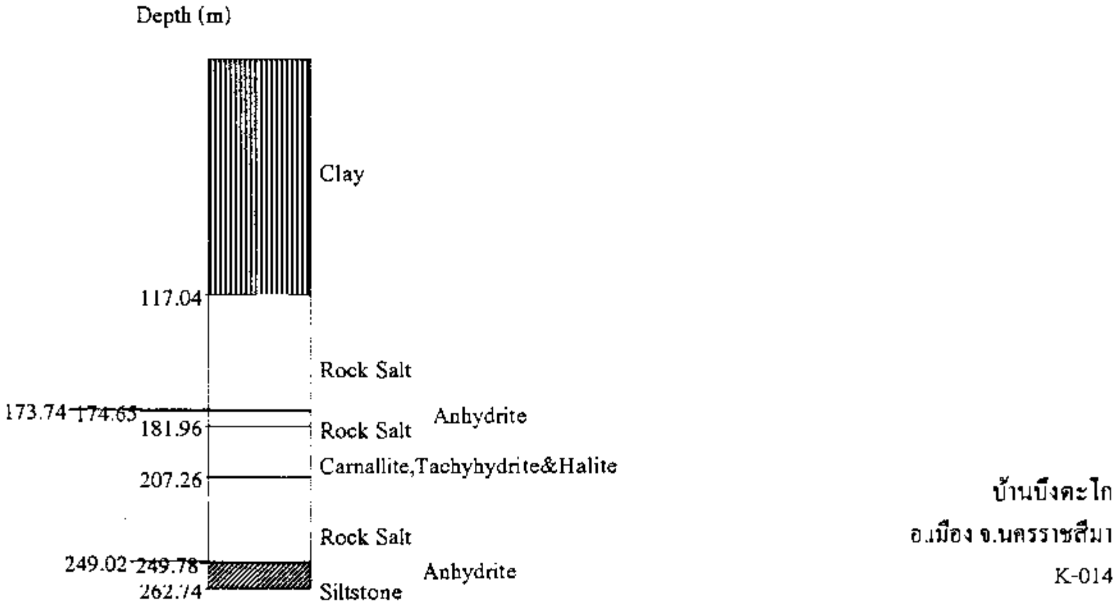
ภาคผนวก



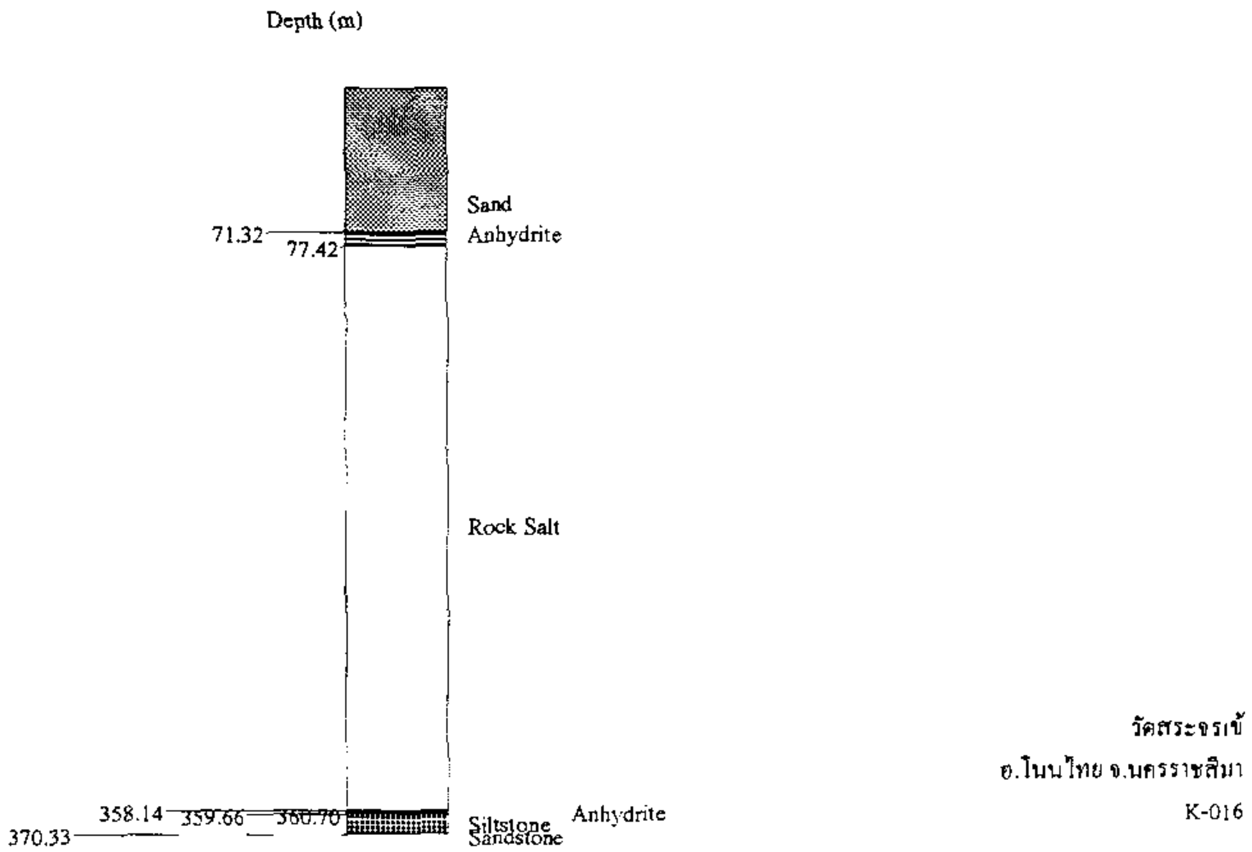
รูปที่ ผ-1 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-001, K-014, K-016, K-021, K-022, K-024, K-026, K-028, K-030, K-034, K-075, K-077, K-096, K-098 และ K-102 สำหรับรูปที่ ผ-2 ถึงรูปที่ ผ-17



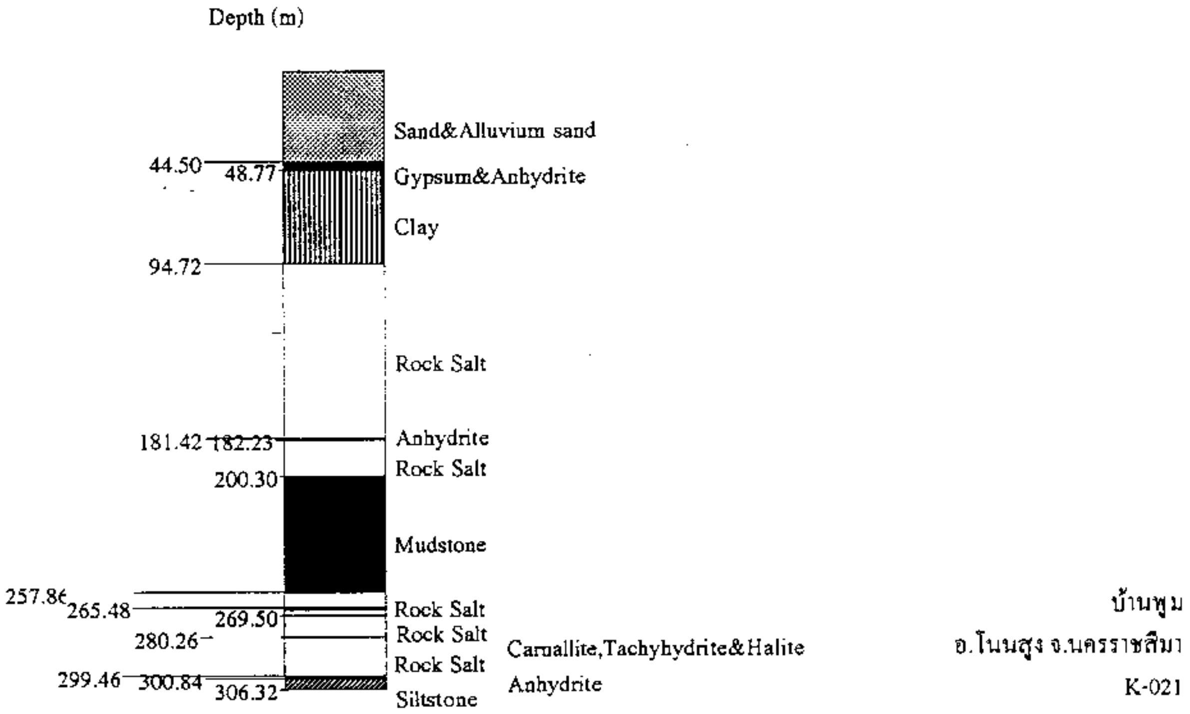
รูปที่ ผ-2 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-001 สำนักงานชลประทาน ถนนวัฒนา อ.เมือง จ.นครราชสีมา



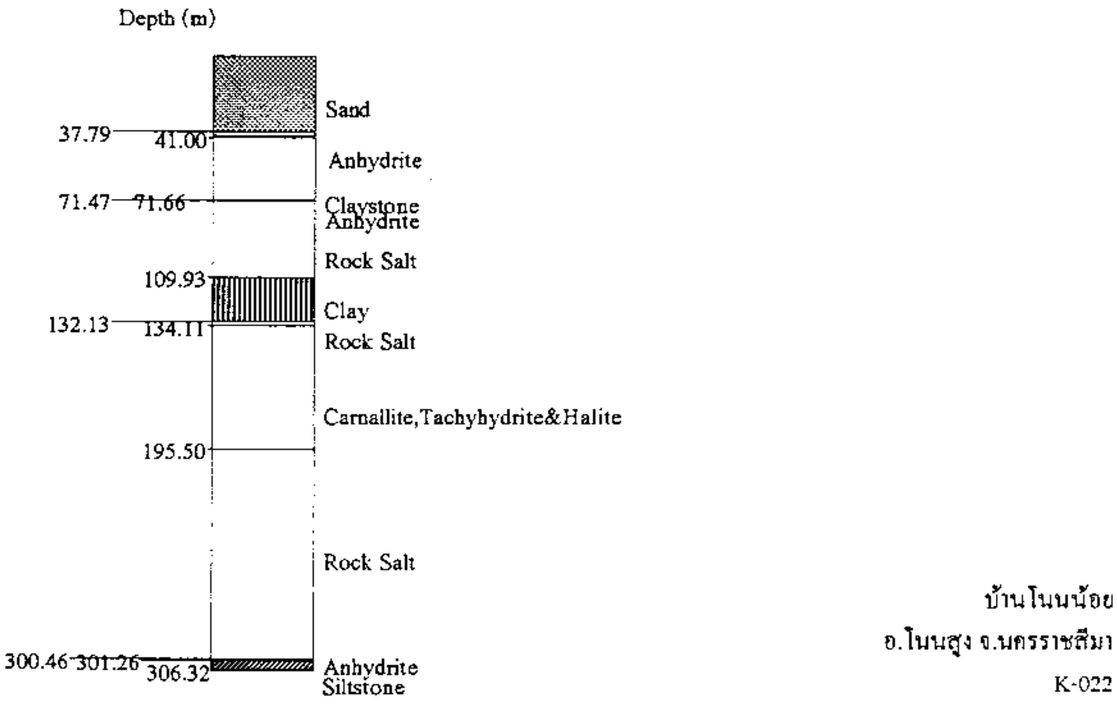
รูปที่ ผ-3 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-014 บ้านบึงตะโก อ.เมือง จ.นครราชสีมา



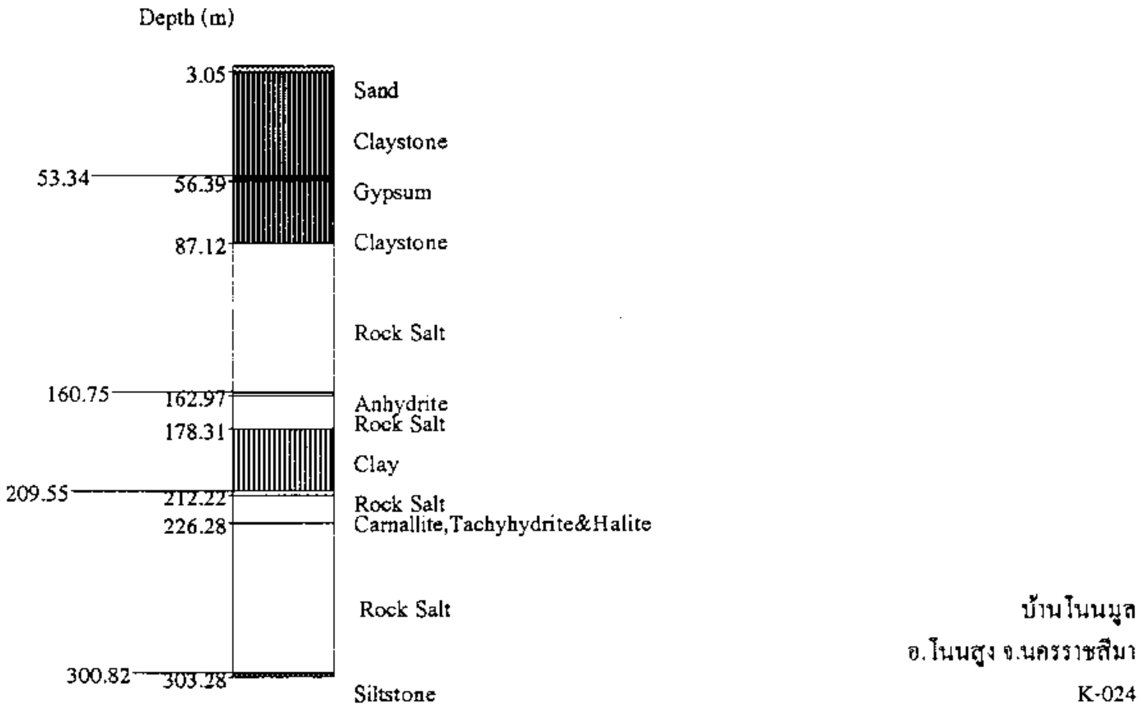
รูปที่ ผ-4 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-016 วัดสระจรเข้ อ.โนนไทย จ.นครราชสีมา



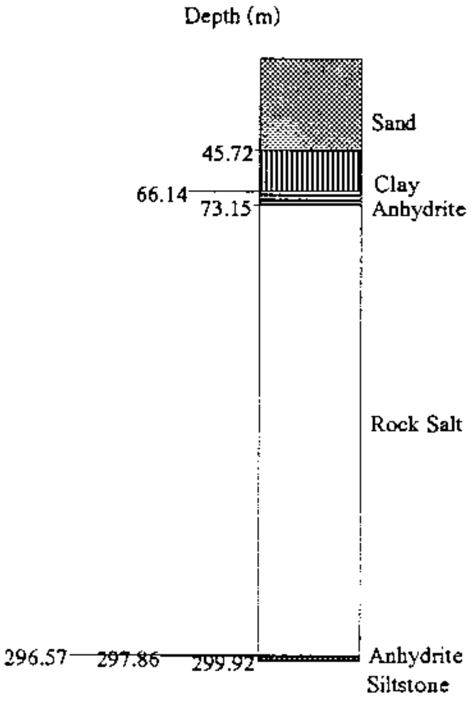
รูปที่ ผ-5 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-021 บ้านพูม อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา



รูปที่ ผ-6 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-022 บ้านโนนน้อย อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา

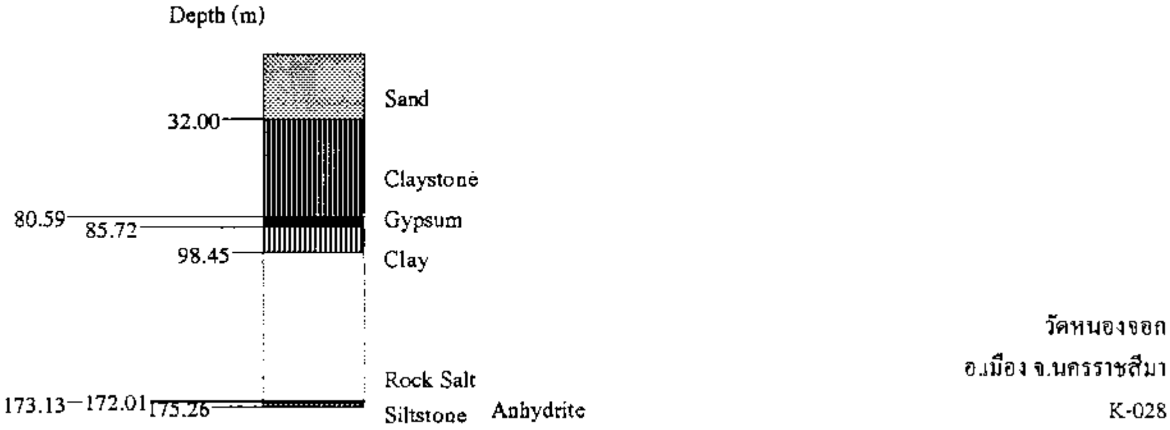


รูปที่ ผ-7 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-024 บ้านโนนมูล อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา

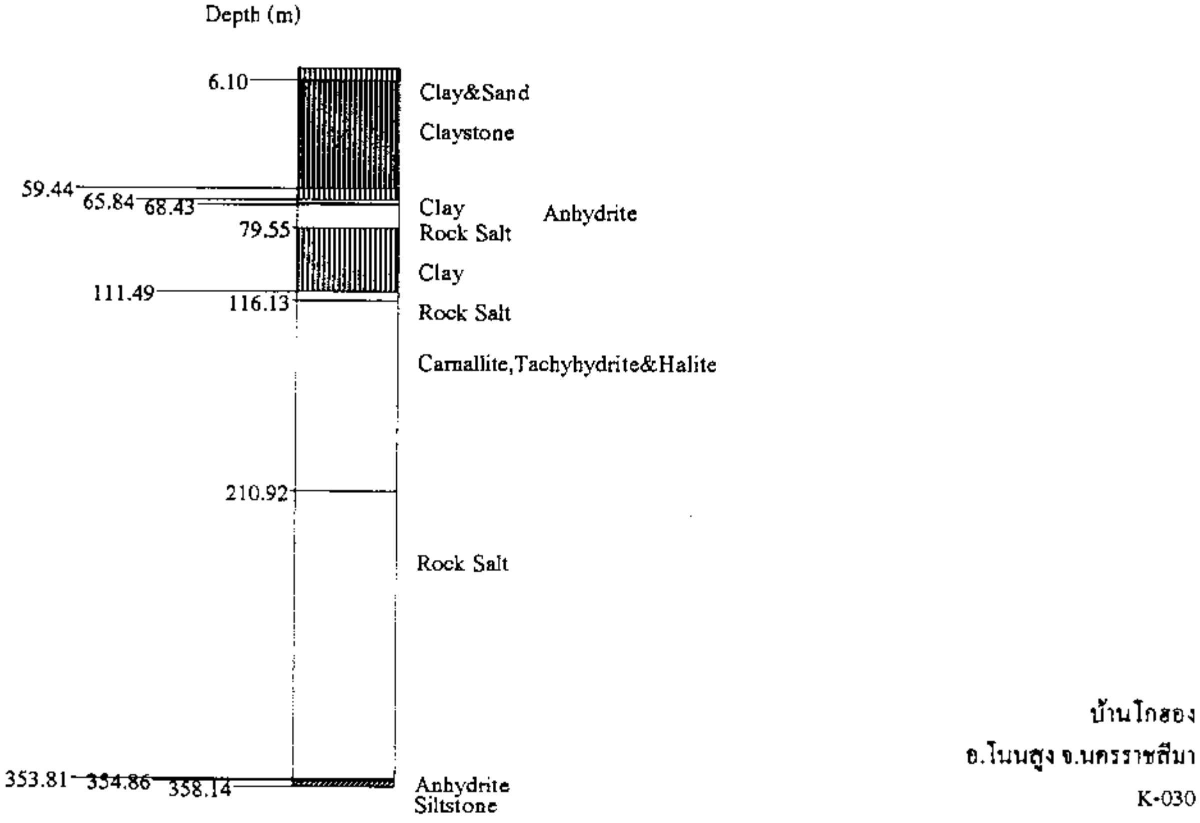


บ้านผาไล
อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา
K-026

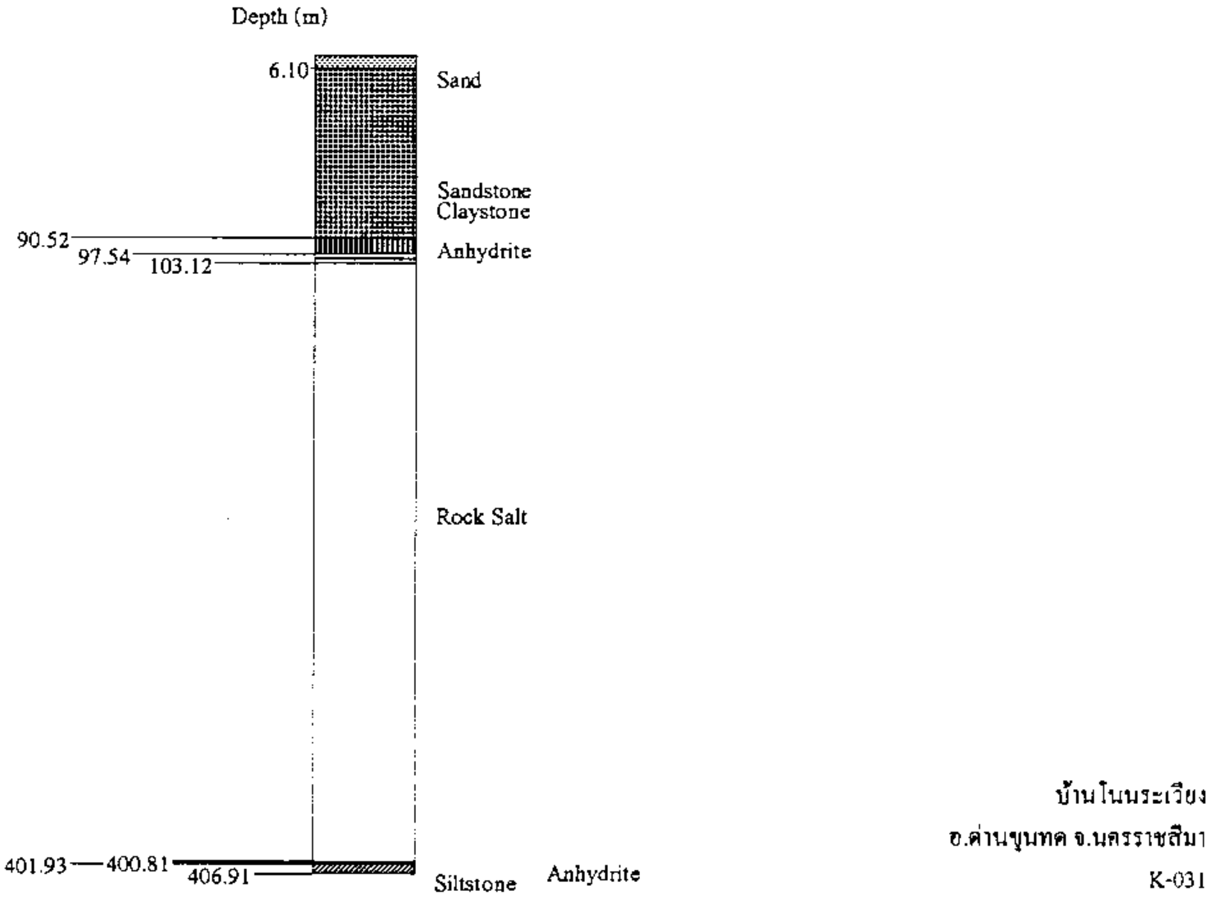
รูปที่ ผ-8 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-026 บ้านผาไล อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา



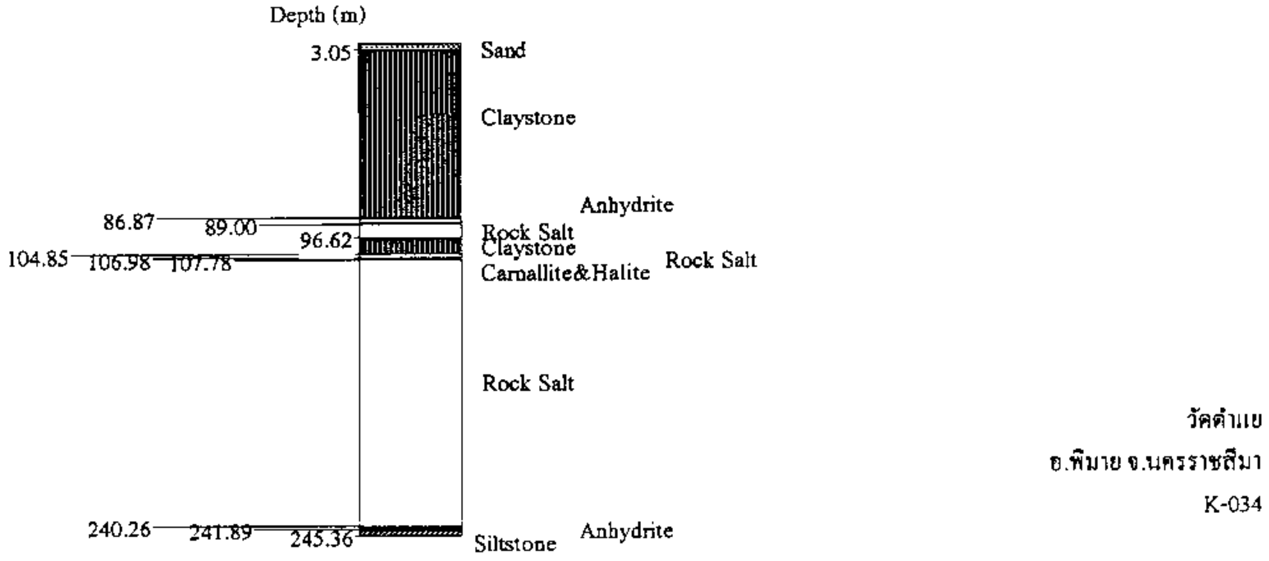
รูปที่ ผ-9 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-028 วัดหนองจอก อ.เมือง จ.นครราชสีมา



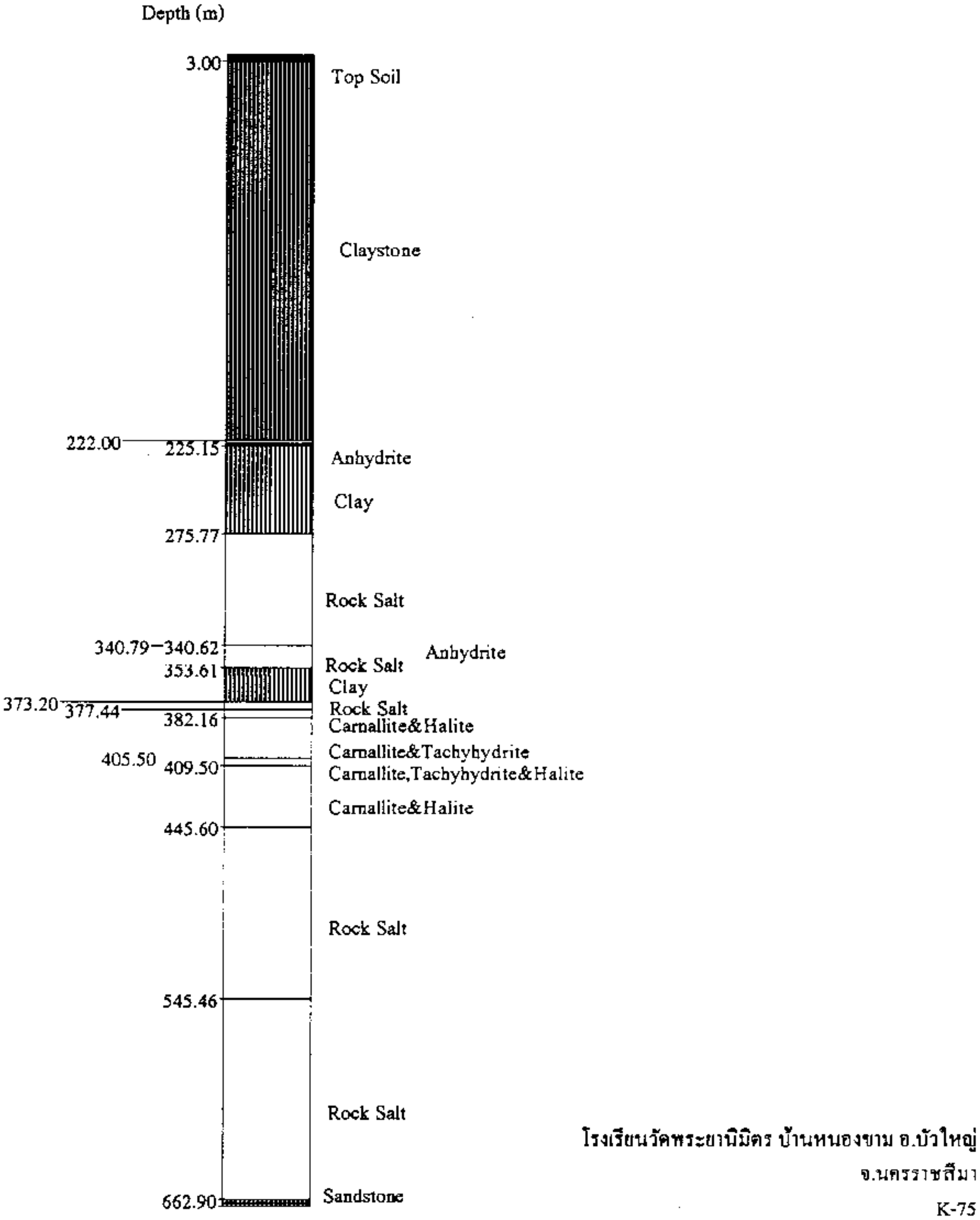
รูปที่ ผ-10 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-030 บ้านโกฮอง อ.โนนสูง จ.นครราชสีมา



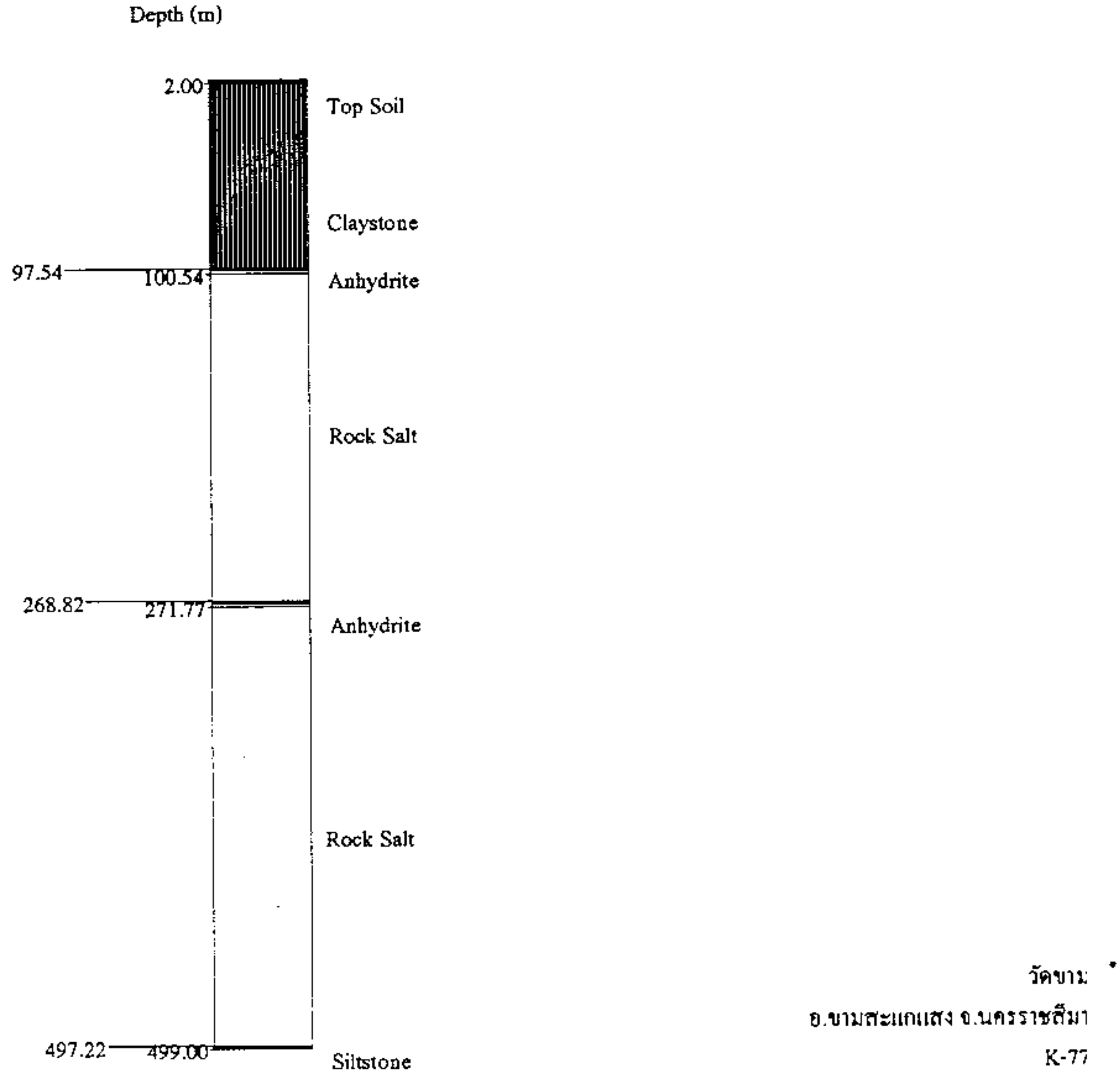
รูปที่ ผ-11 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-031 บ้านโนนระเวียง อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา



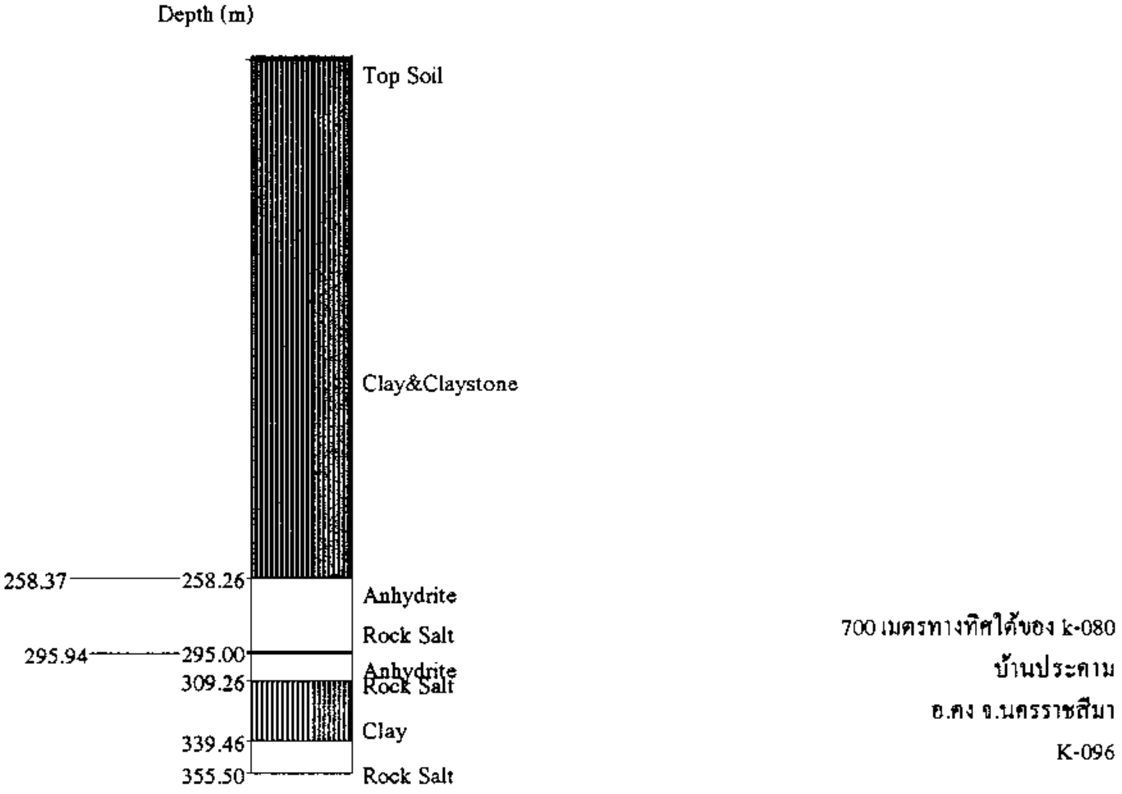
รูปที่ ผ-12 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-034 วัดตำแย อ.พิมาย จ.นครราชสีมา



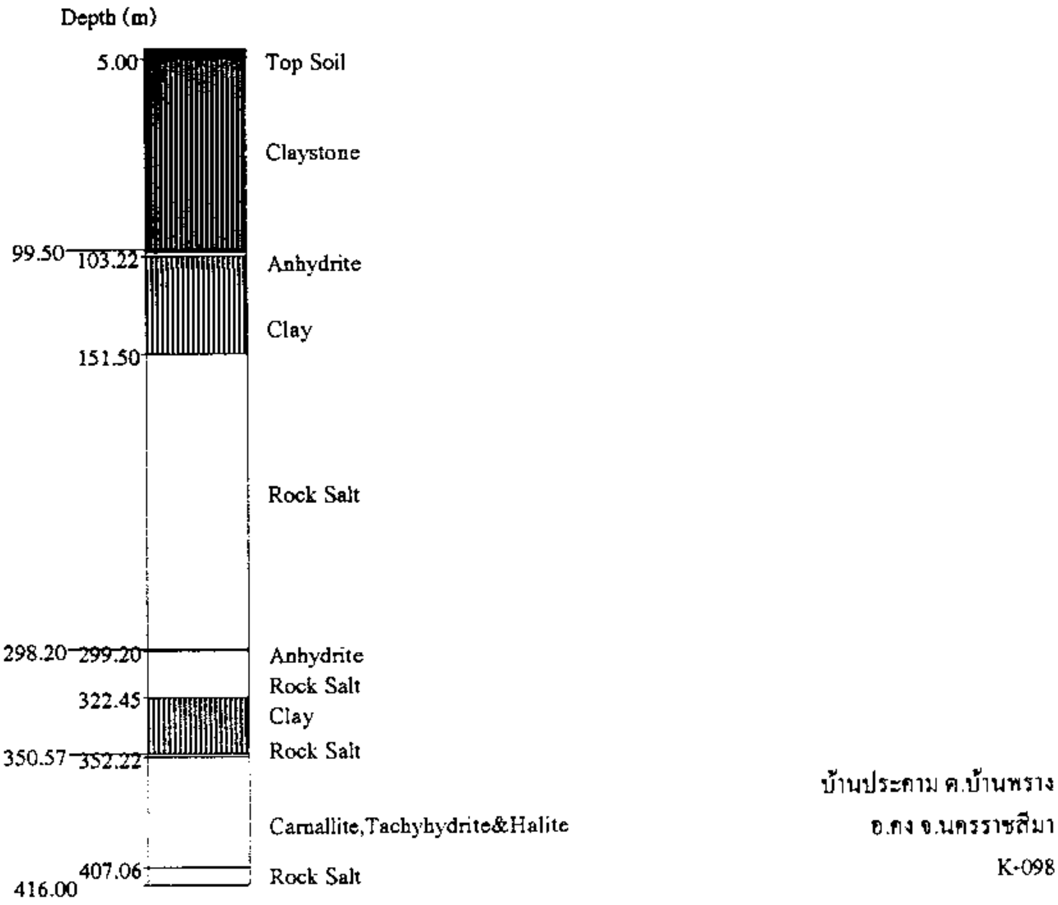
รูปที่ ผ-13 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-075 โรงเรียนวัดพระยานิมิตร บ้านหนองขาม อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา



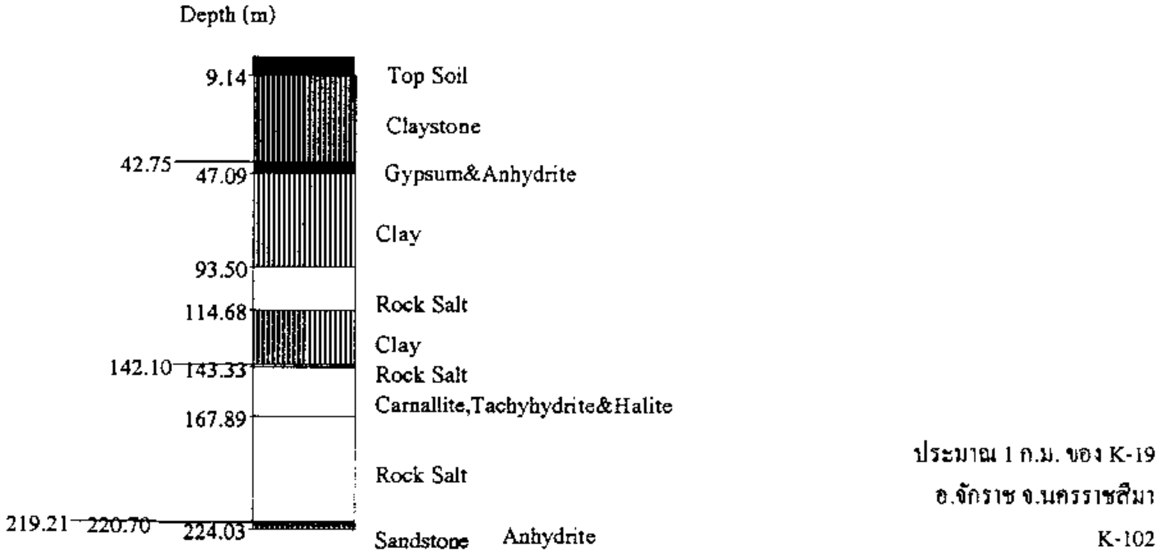
รูปที่ ผ-14 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-077 วัดขาม อ.ขามสะแกแสง จ.นครราชสีมา



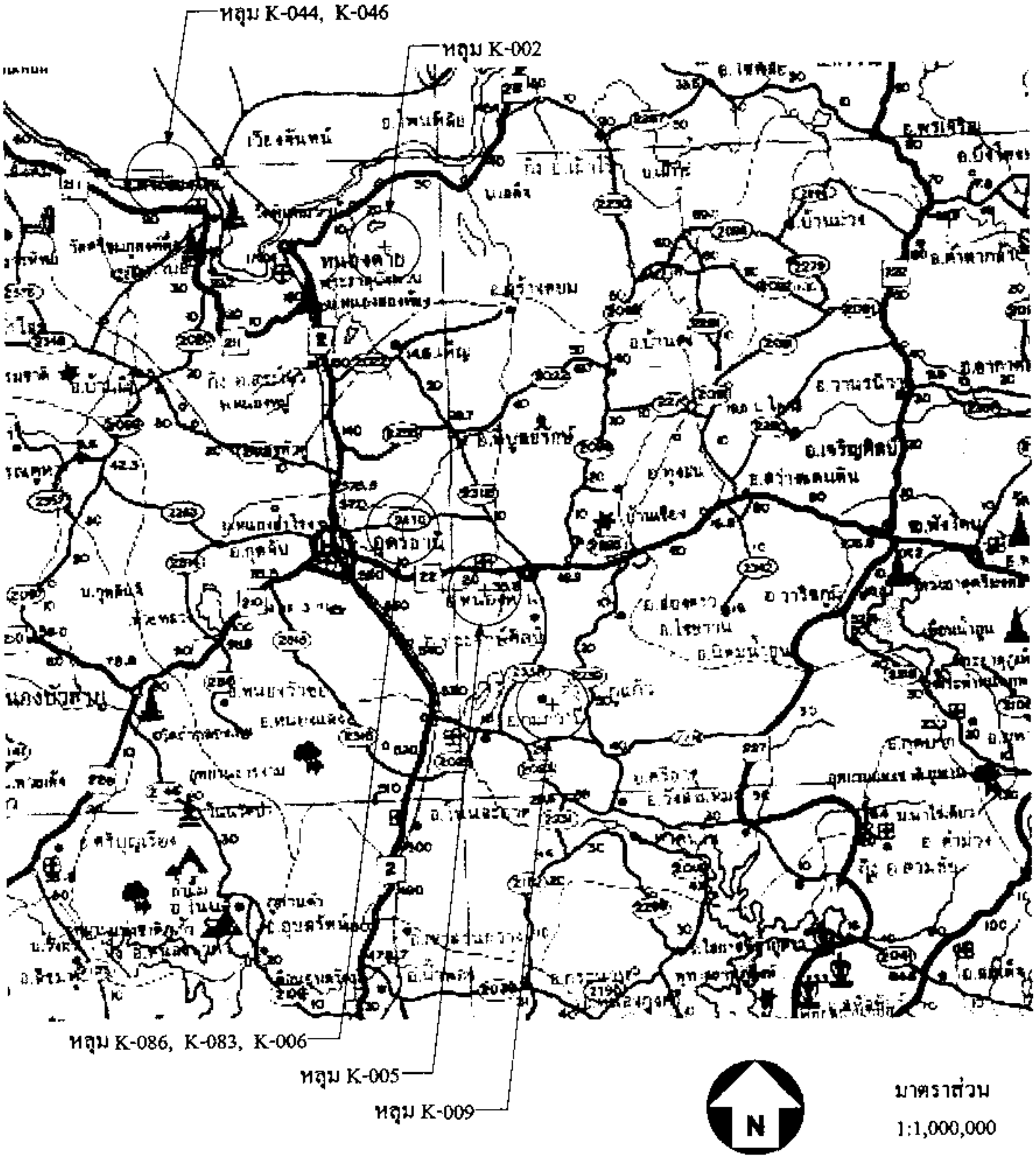
รูปที่ ผ-15 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-096 700 เมตรทางทิศใต้ของ k-080 บ้านประคาม อ.คง จ.นครราชสีมา



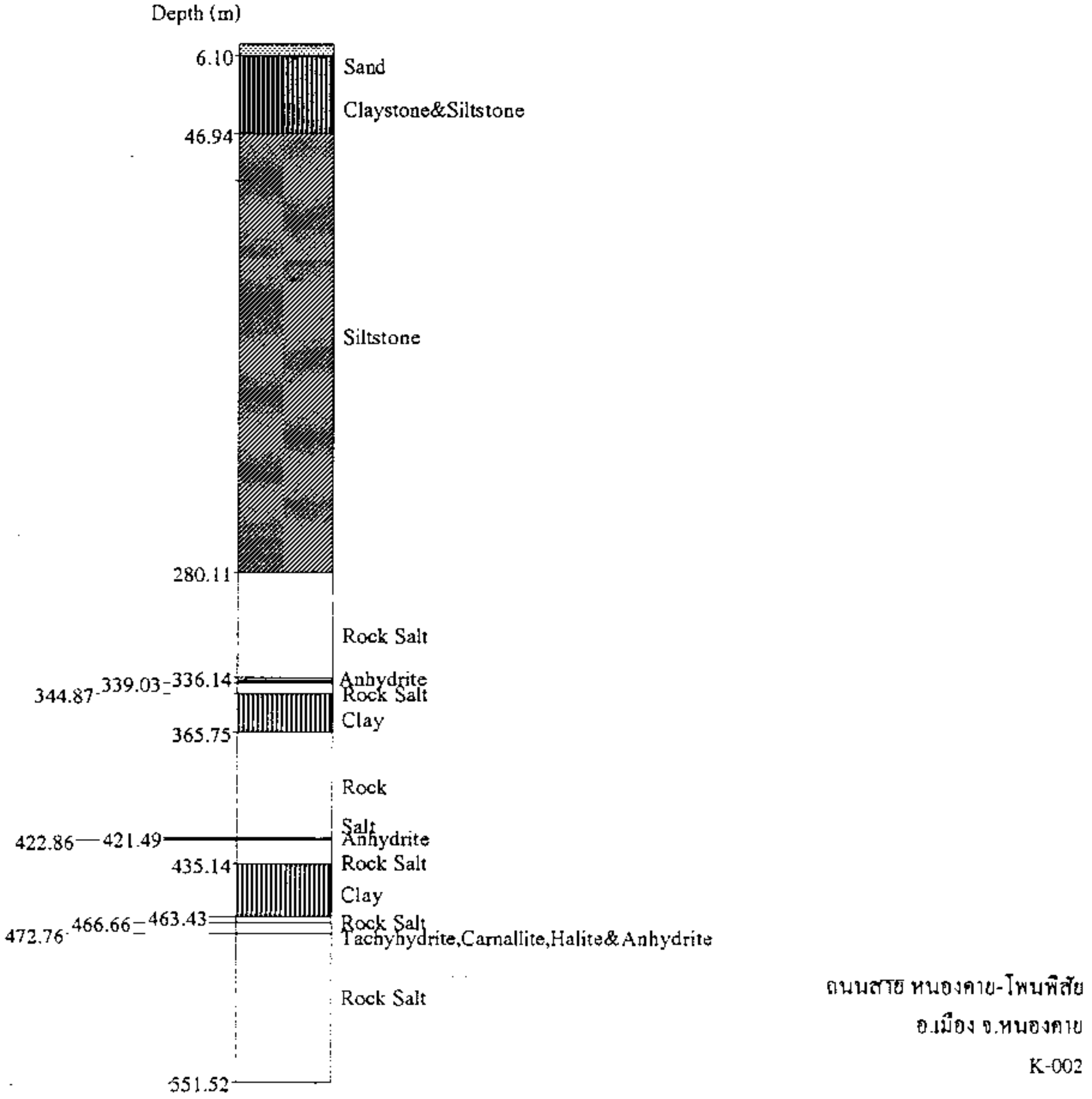
รูปที่ ผ-16 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-098 บ้านประคาม ต.บ้านพราง อ.คง จ.นครราชสีมา



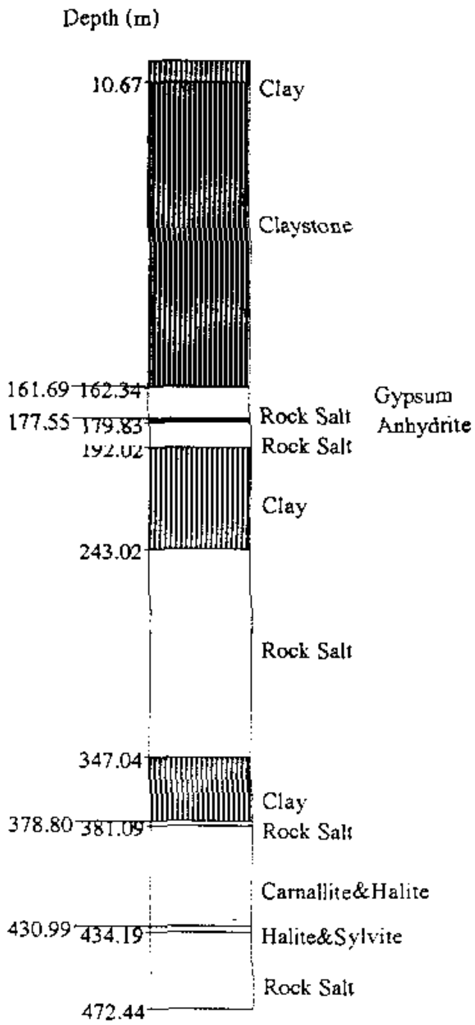
รูปที่ ผ-17 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-102 ประมาณ 1 ก.ม. ของ k-19 อ.จักราช จ.นครราชสีมา



รูปที่ ผ-18 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-002, K-005, K-006, K-044, K-046 และ K-083 สำหรับรูปที่ ผ-19 ถึงรูปที่ ผ-24

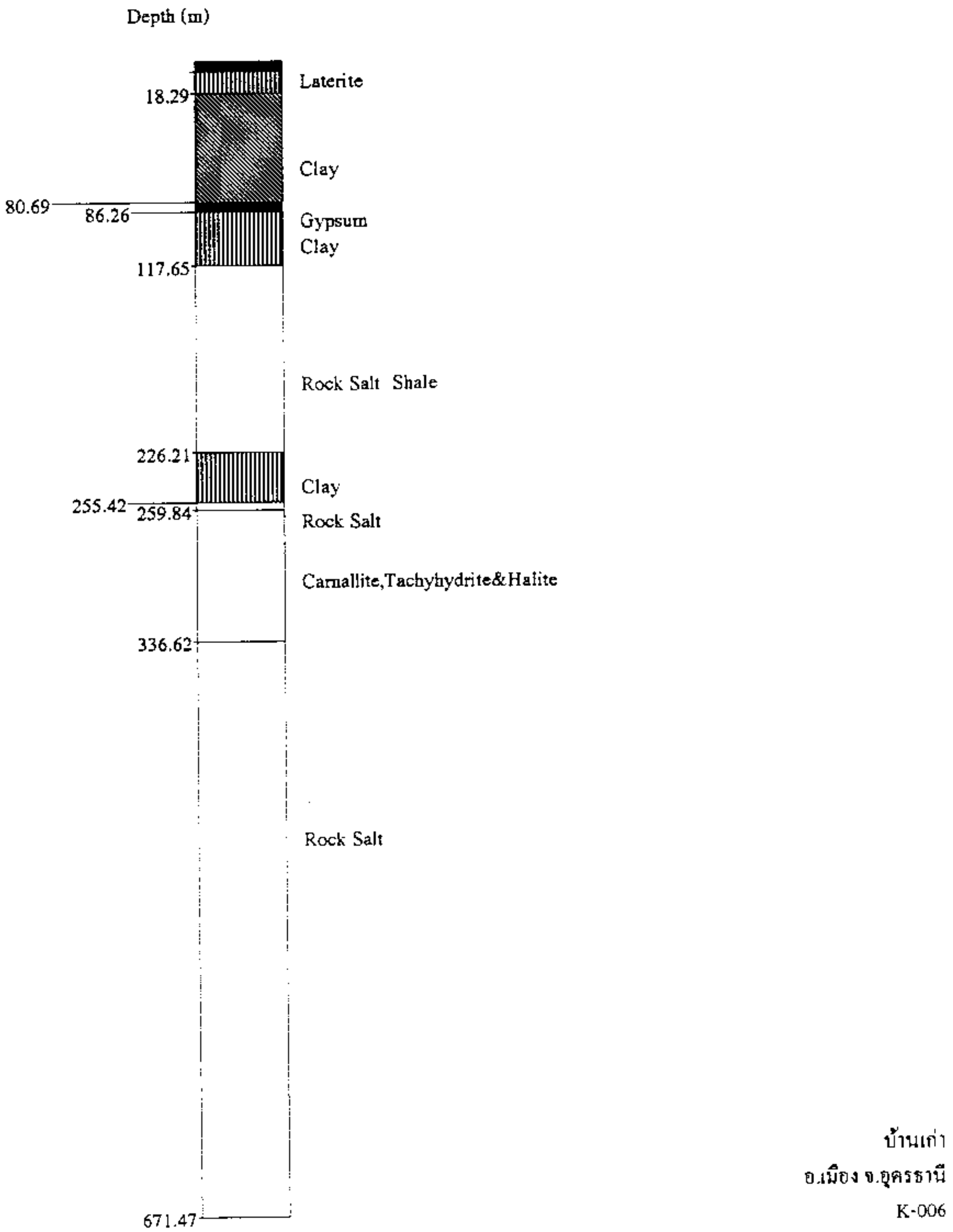


รูปที่ ผ-19 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-002 ถนนสายหนองคาย-โพนพิสัย อ.เมือง จ.หนองคาย

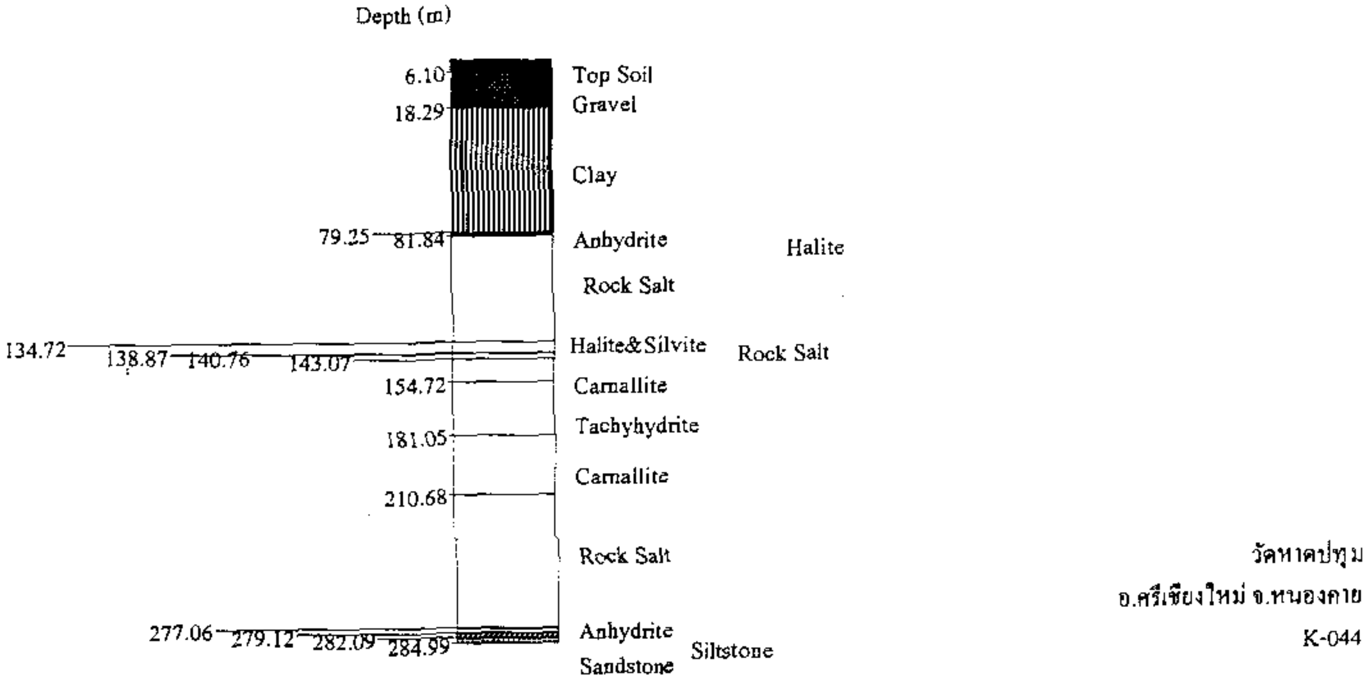


อ.หนองหาน จ.อุดรธานี
K-005

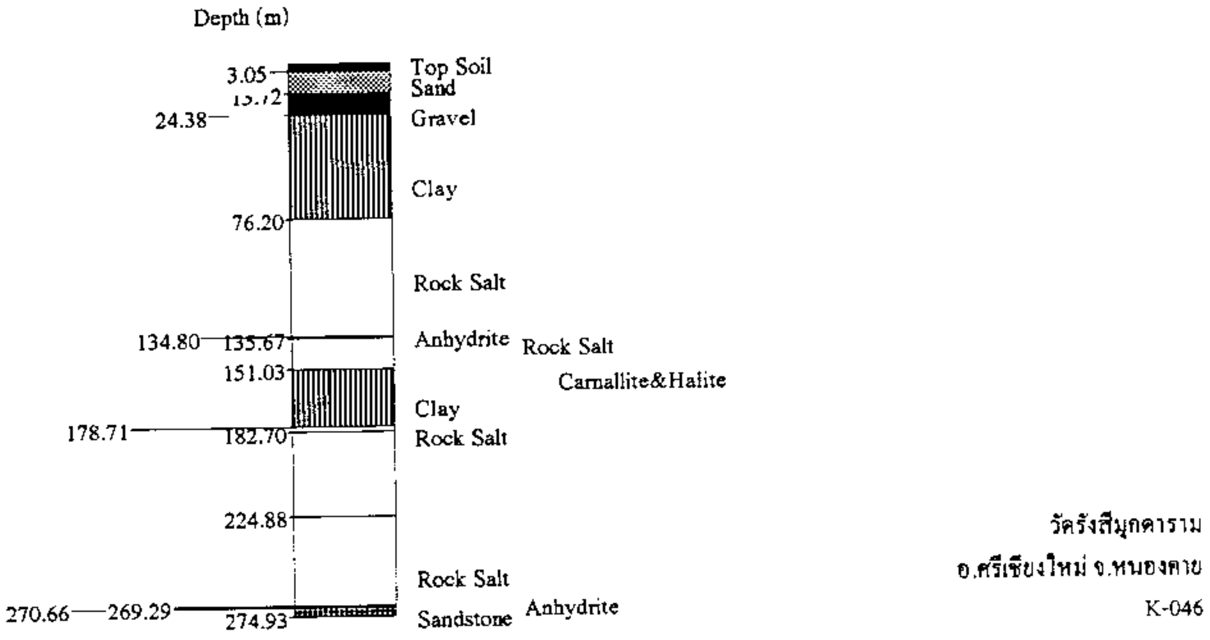
รูปที่ ผ-20 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-005 อ.หนองหาน จ.อุดรธานี



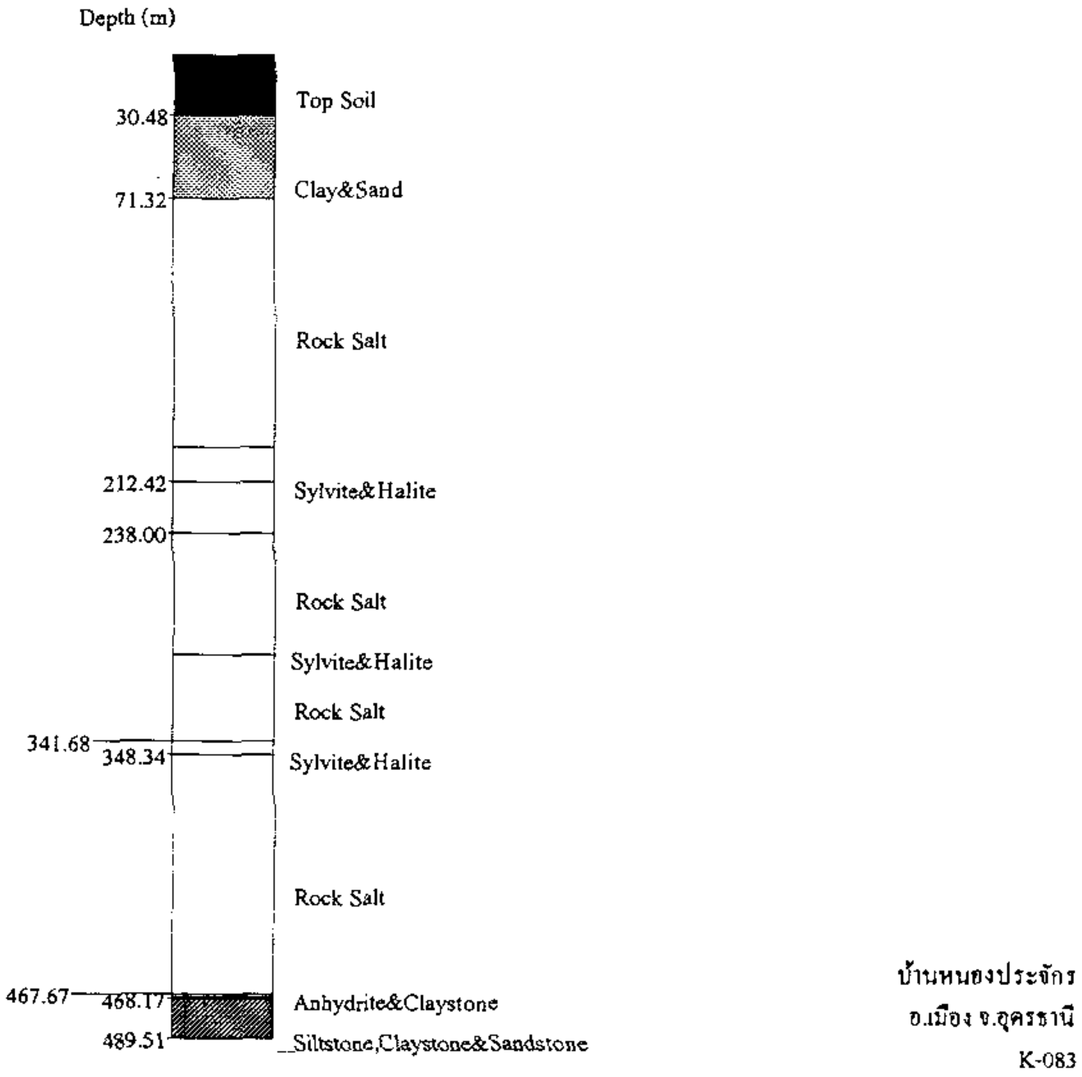
รูปที่ ผ-21 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-006 บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี



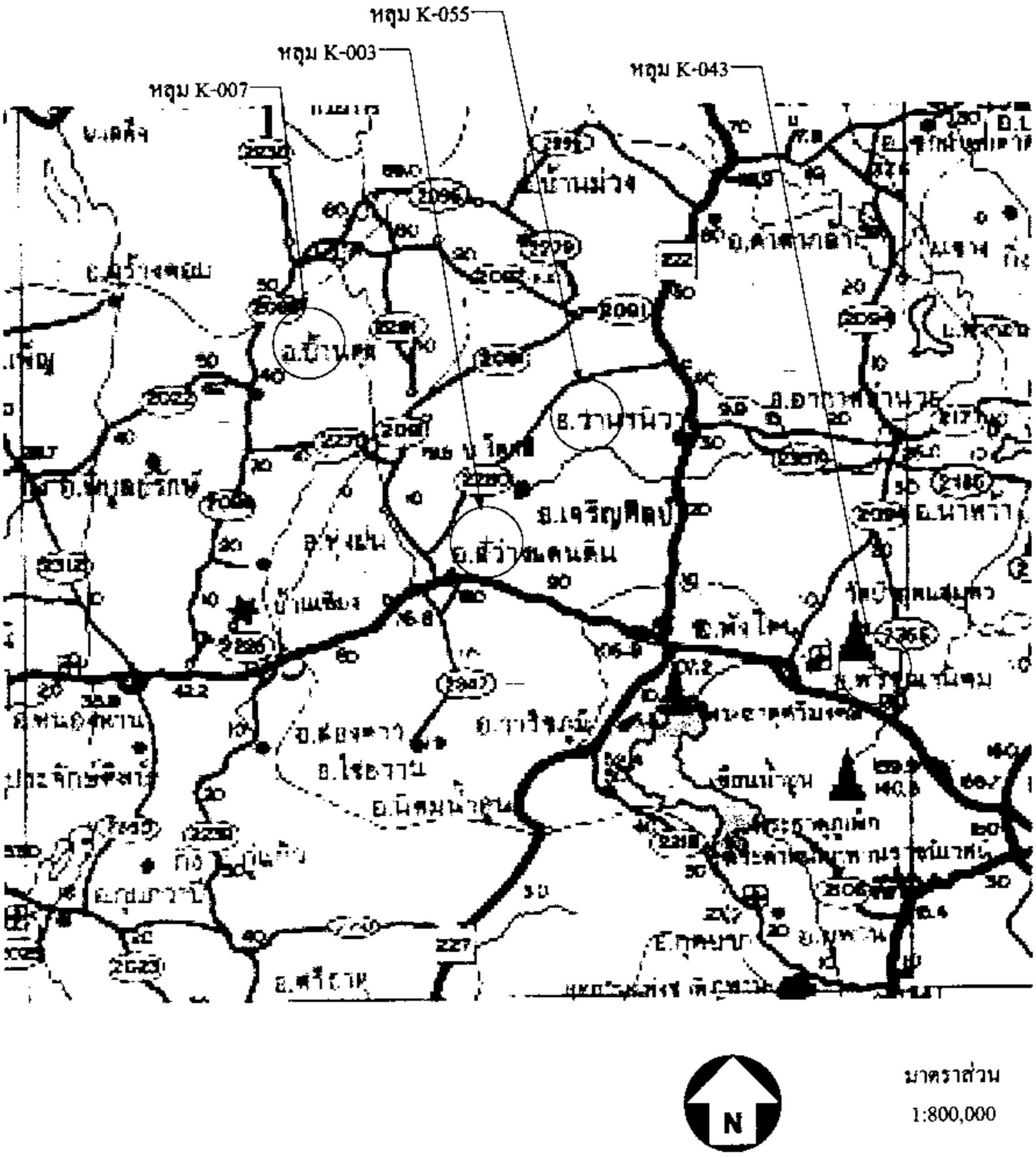
รูปที่ ผ-22 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-044 วัดหาดปทุม อ.ศรีเชียงใหม่ จ.หนองคาย



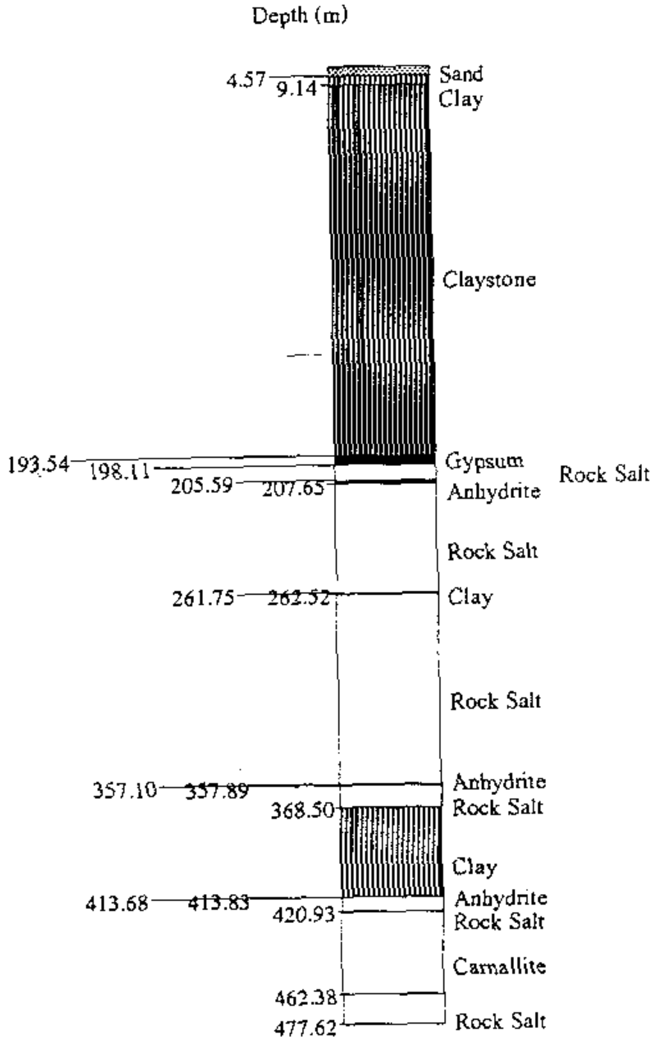
รูปที่ ผ-23 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-046 วัดรังสีมุกดาราม อ.ศรีเชียงใหม่ จ.หนองคาย



รูปที่ ผ-24 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-083 บ้านหนองประจักร อ.เมือง จ.อุดรธานี

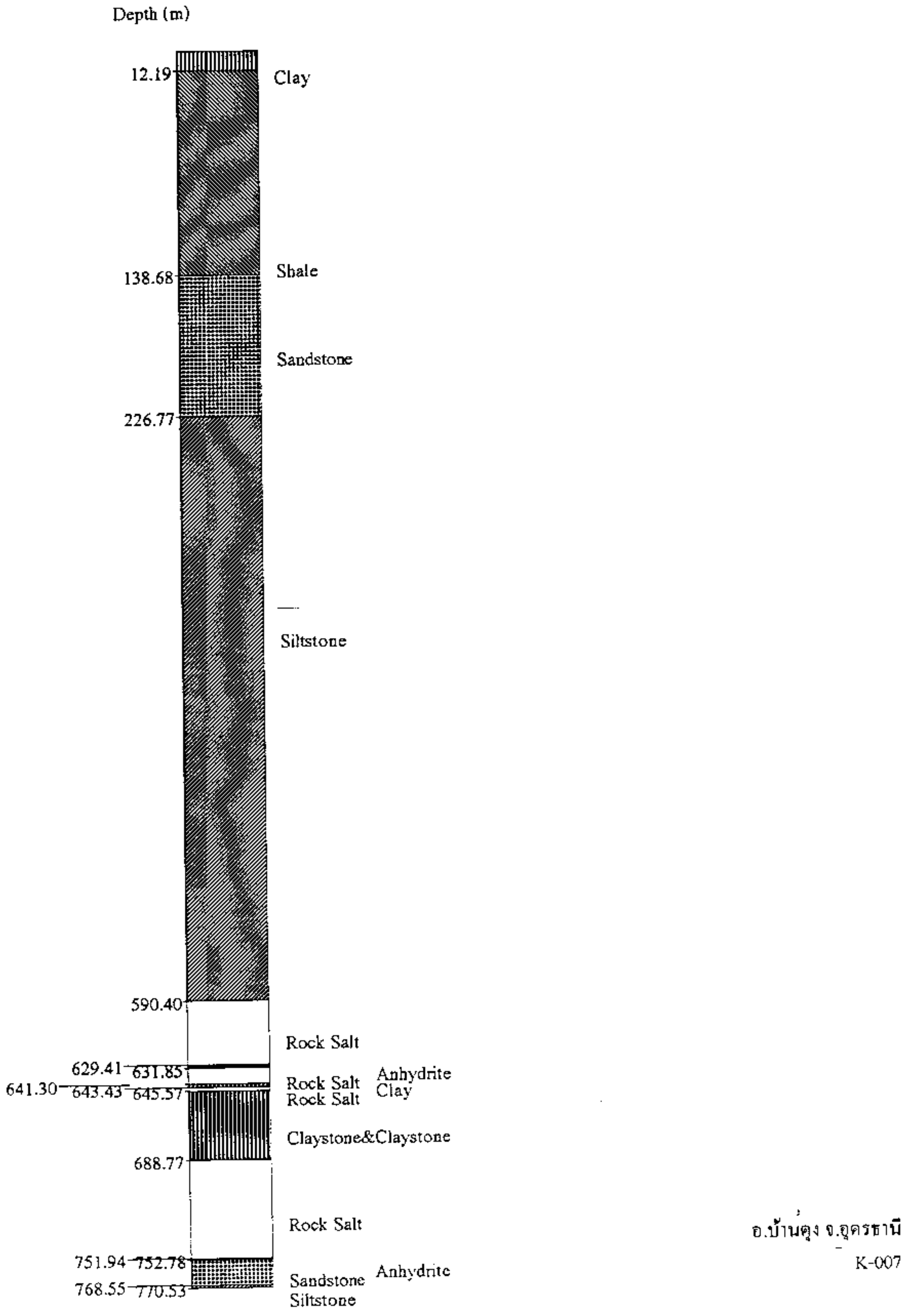


รูปที่ ผ-25 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-003, K-007, K-043 และ K-055
สำหรับรูปที่ ผ-26 ถึงรูปที่ ผ-29

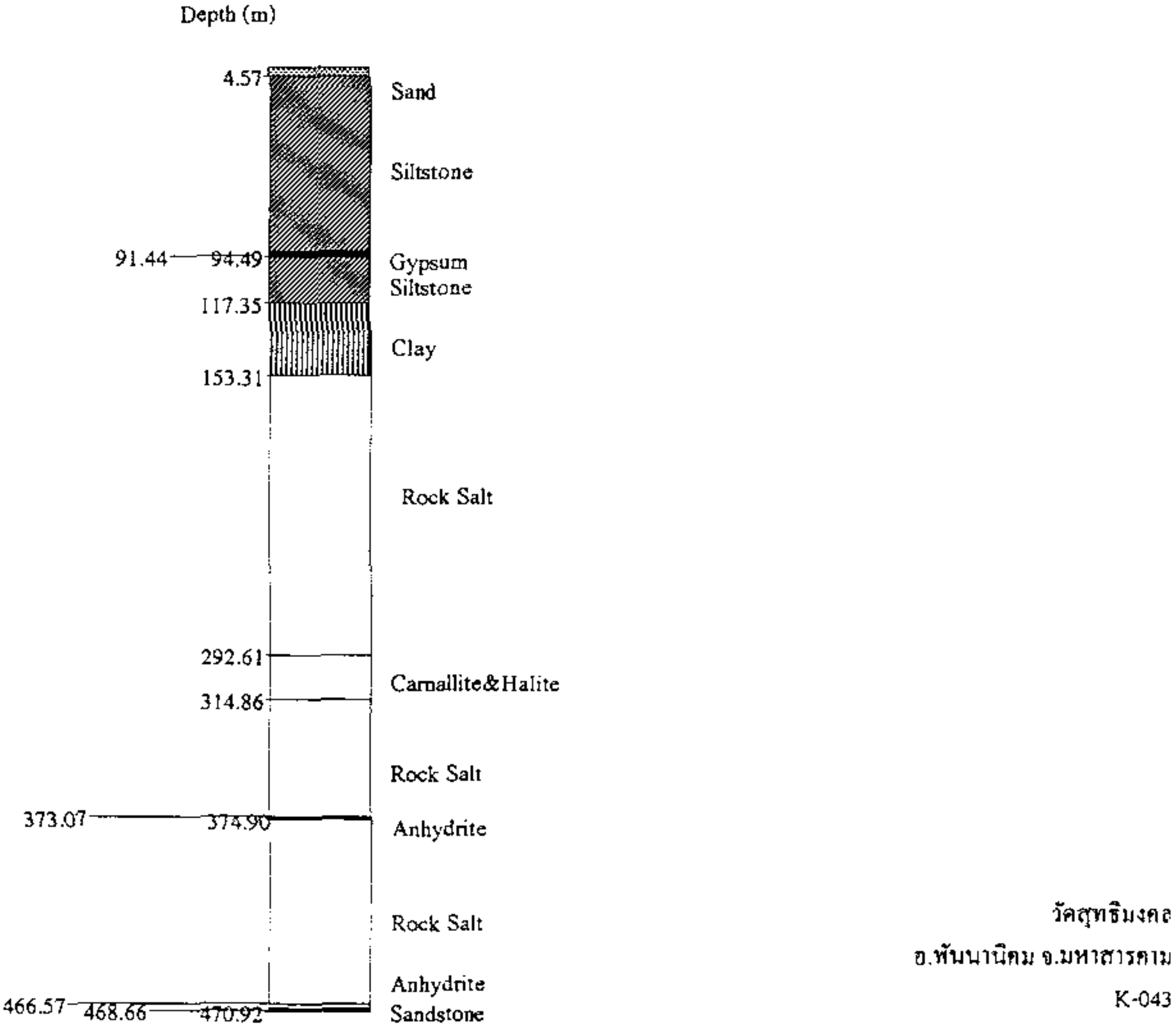


วัดสว่างภูมิดล
อ.สว่างแดนดิน จ.สกลนคร
K-003

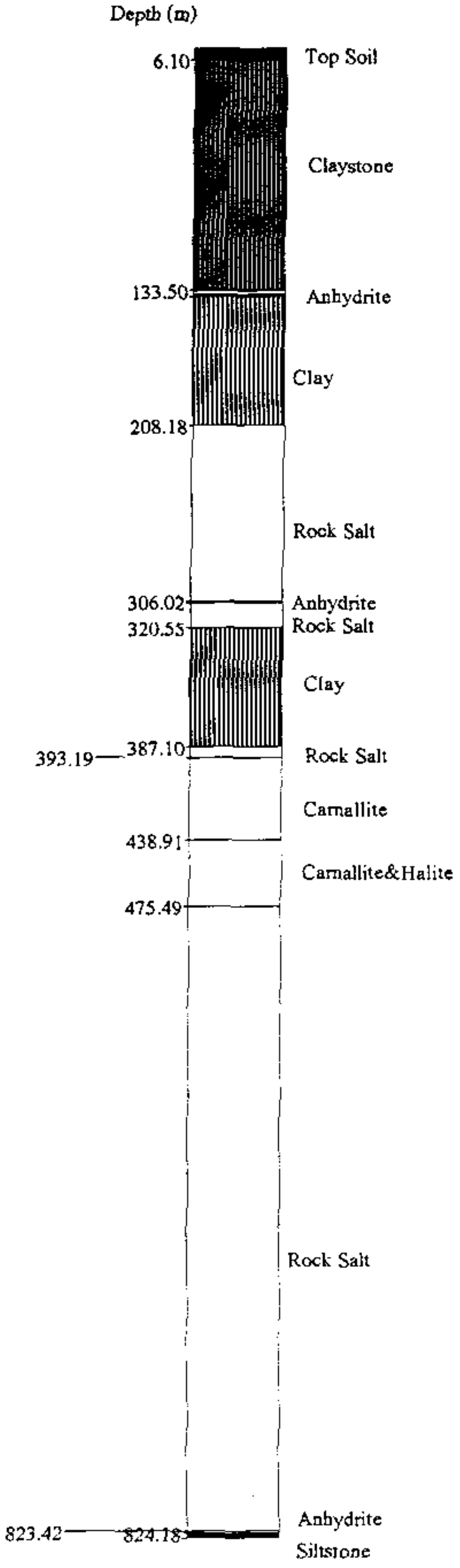
รูปที่ ผ-26 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-003 วัดสว่างภูมิดล อ.สว่างแดนดิน จ.สกลนคร



รูปที่ ผ-27 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-007 อ.บ้านดุง จ.อุดรธานี

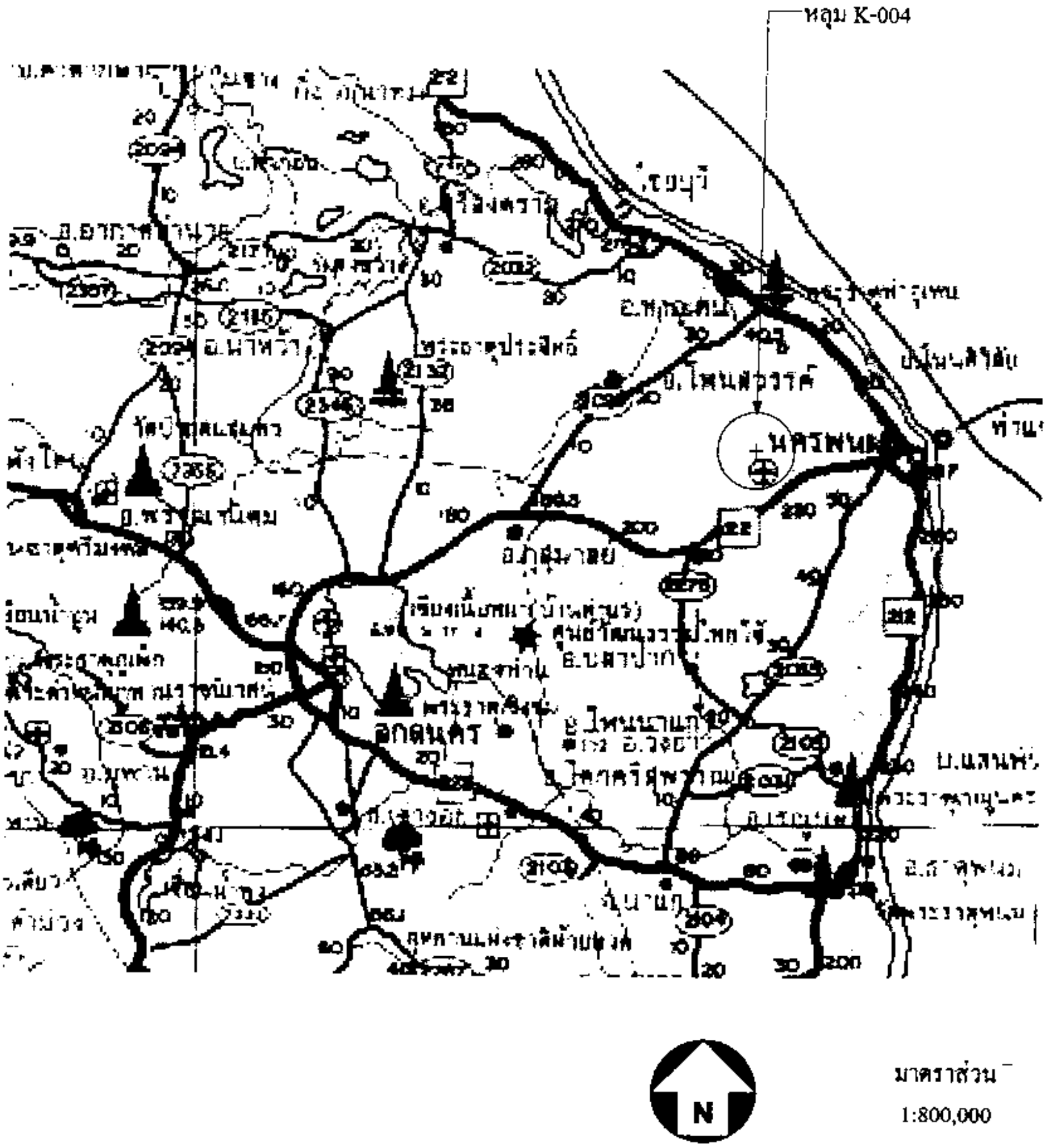


รูปที่ ผ-28 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-043 วัดสุทธิมงคล อ.พรรณานิคม จ.สกลนคร

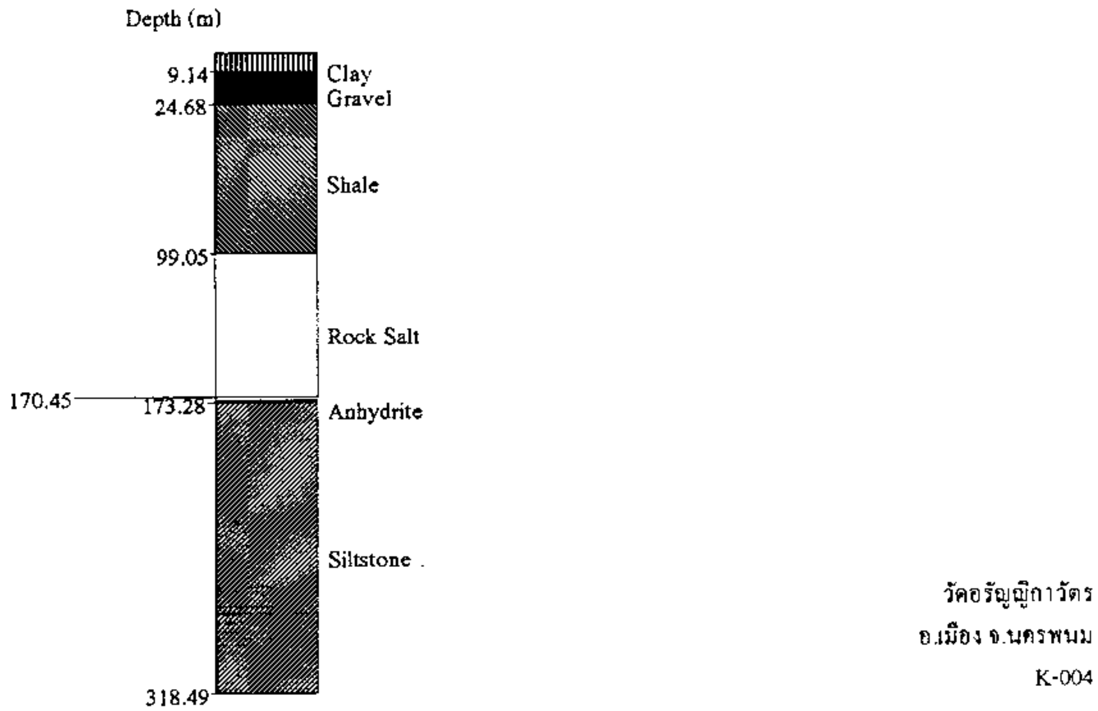


วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก
อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร
K-055

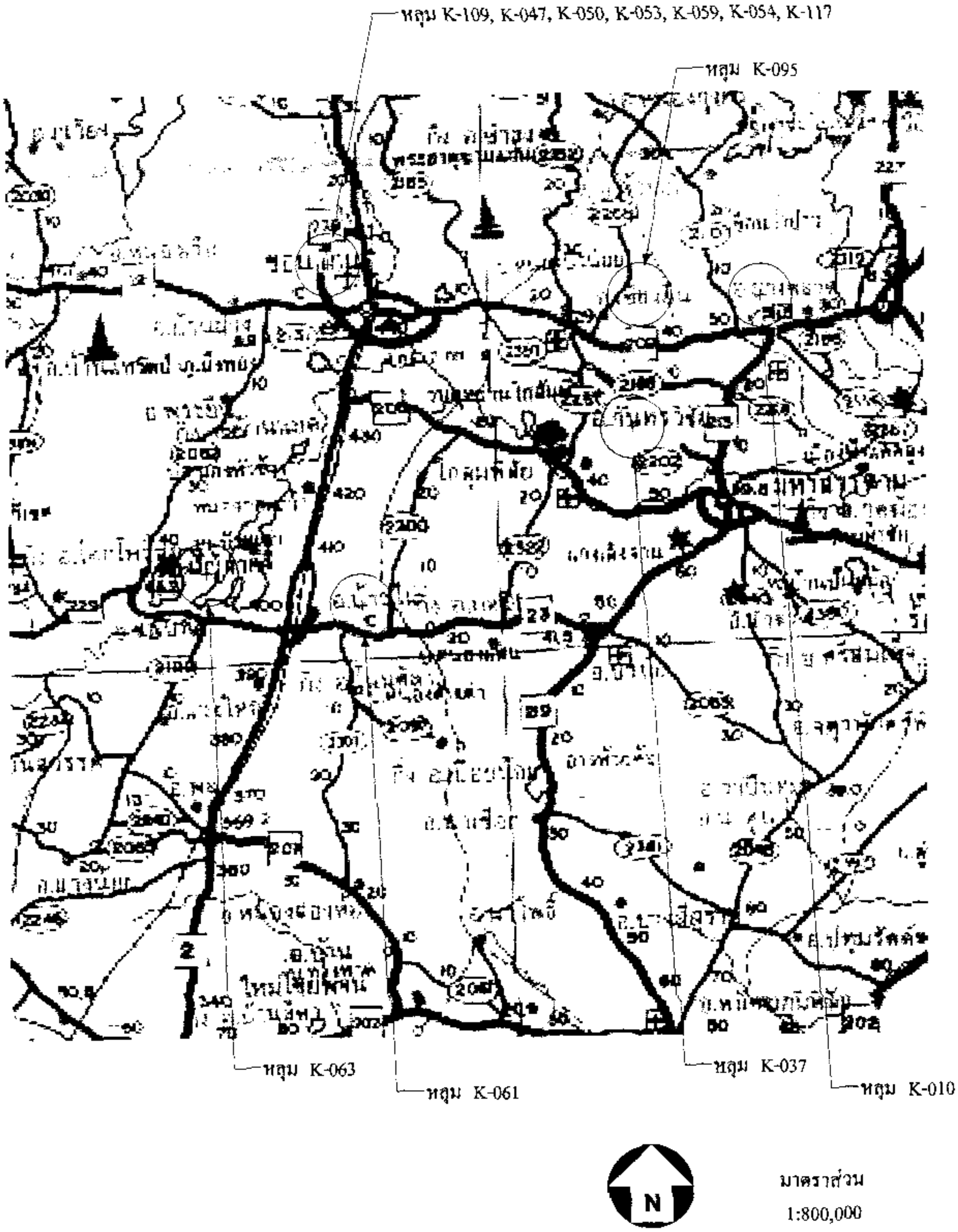
รูปที่ ผ-29 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-055 วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร



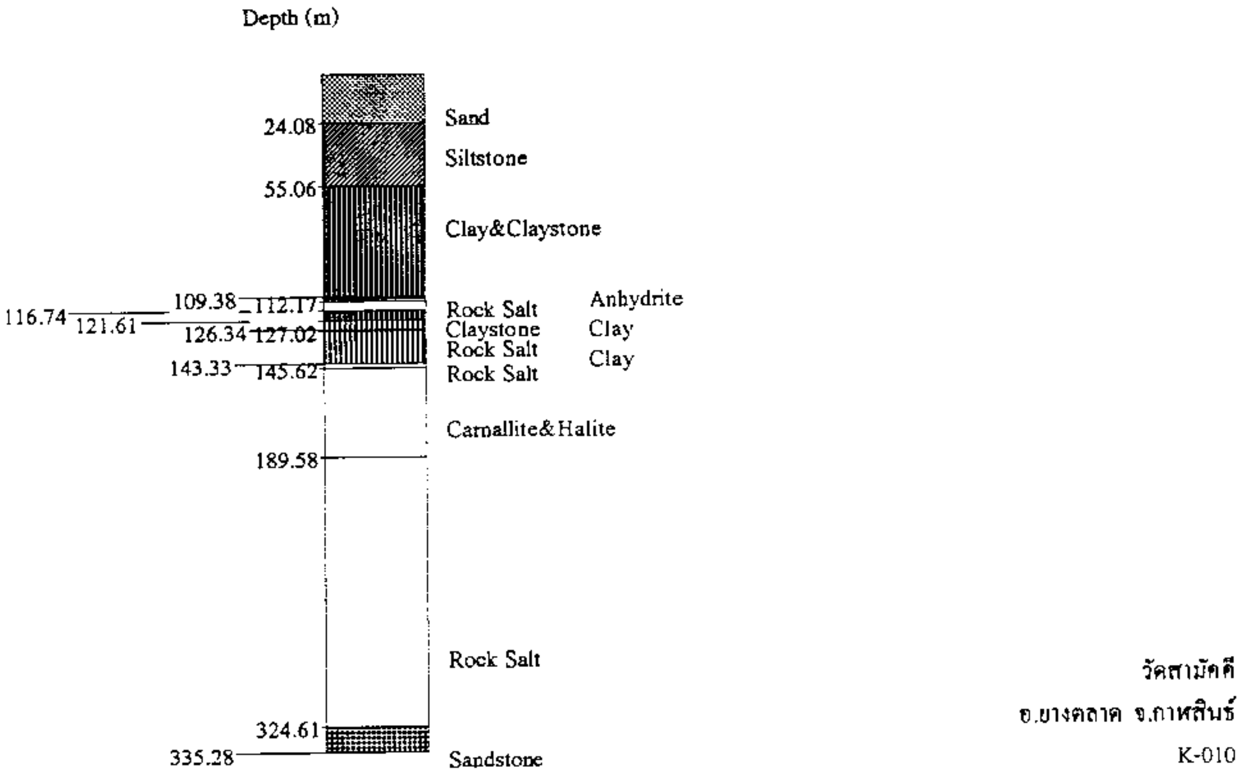
รูปที่ ผ-30 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-004 สำหรับรูปที่ ผ-31



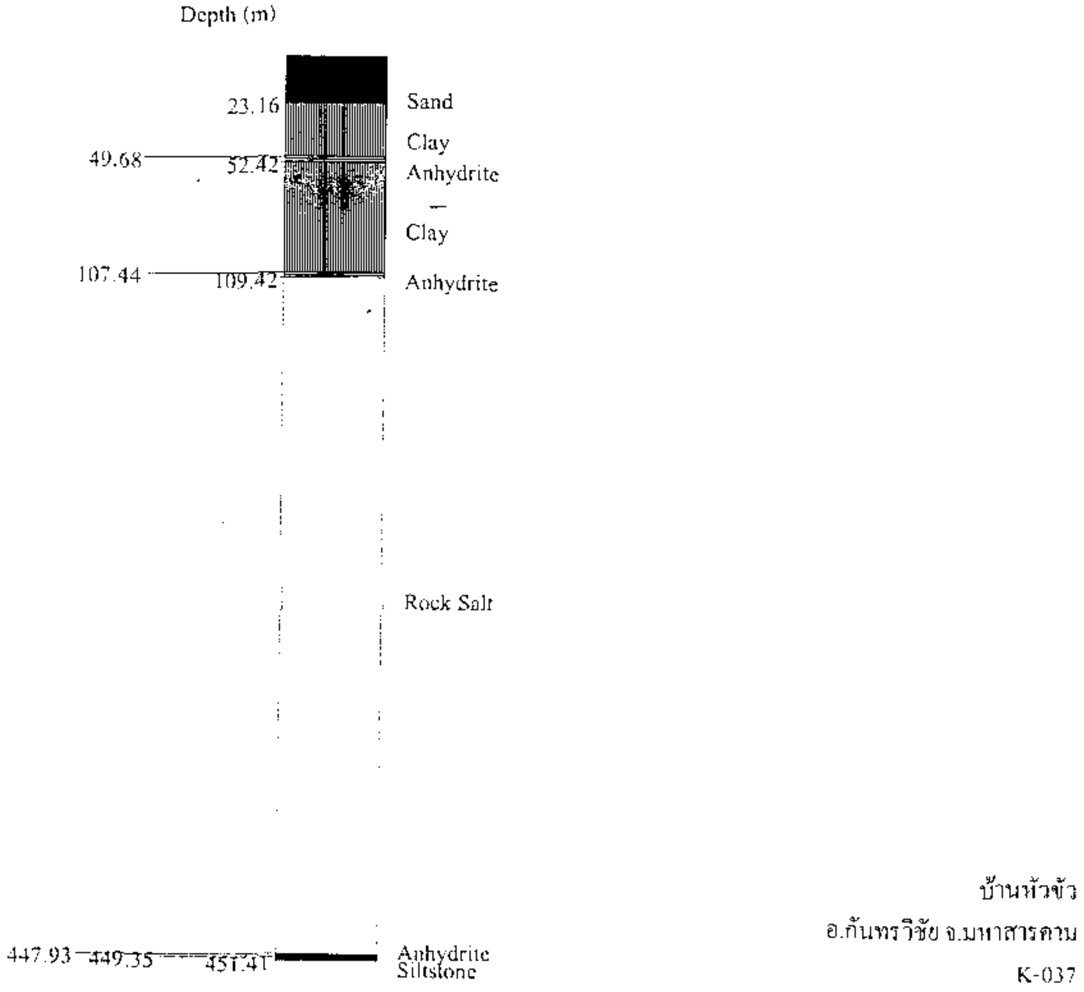
รูปที่ ผ-31 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-004 วัดอรัญญิกาวัตร อ.เมือง จ.นครพนม



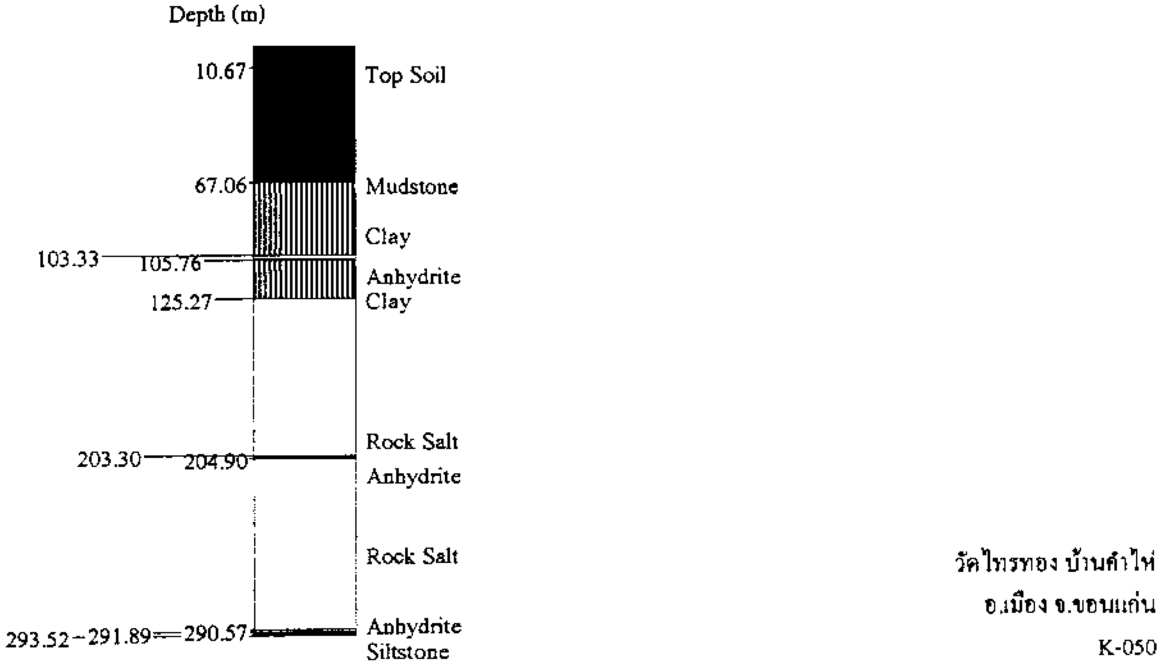
รูปที่ ผ-32 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-010, K-037, K-050, K-053, K-054, K-059, K-063, K-095 และ K-109 สำหรับรูปที่ ผ-33 ถึงรูปที่ ผ-41



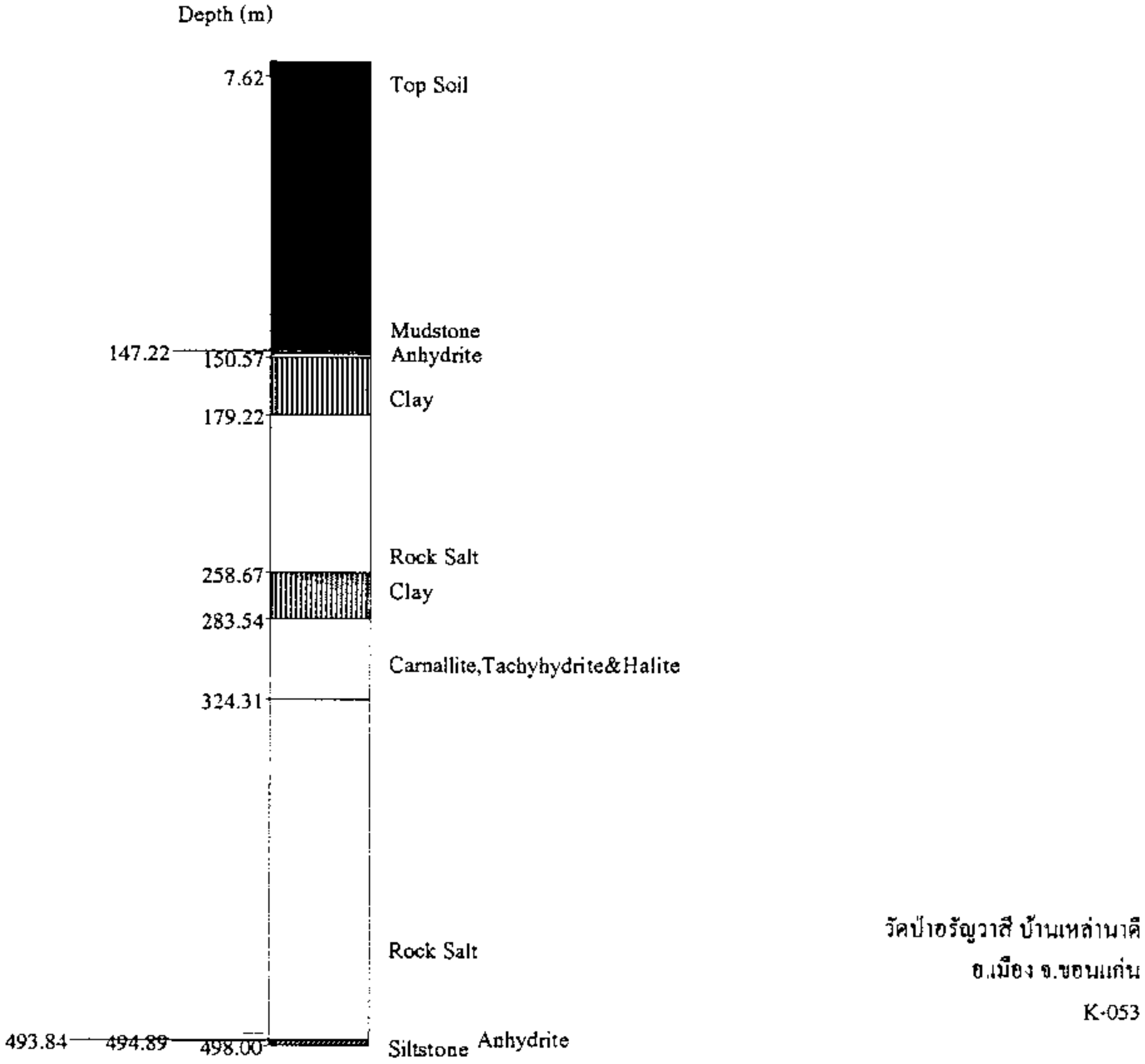
รูปที่ ผ-33 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-010 วัดสามัคคี อ.ยางตลาด จ.กาฬสินธุ์



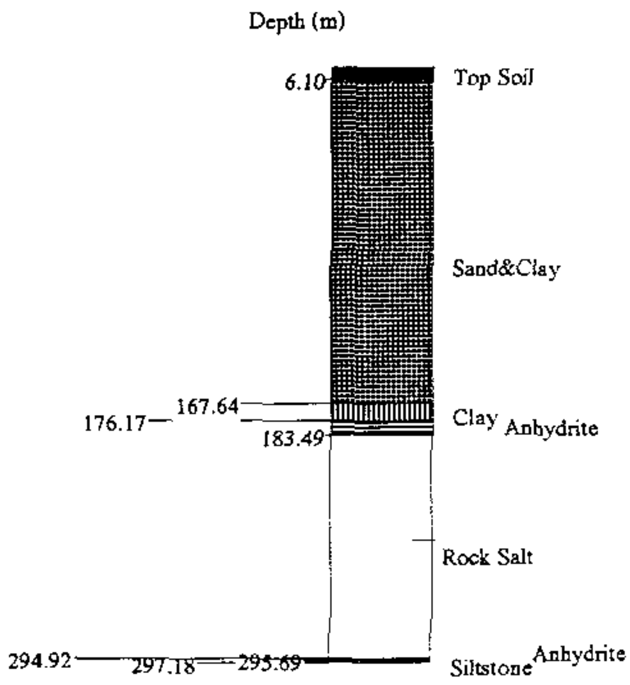
รูปที่ ผ-34 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-037 บ้านหัวขัว อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม



รูปที่ ผ-35 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-050 วัดไทรทอง บ้านคำไห่ อ.เมือง จ.ขอนแก่น

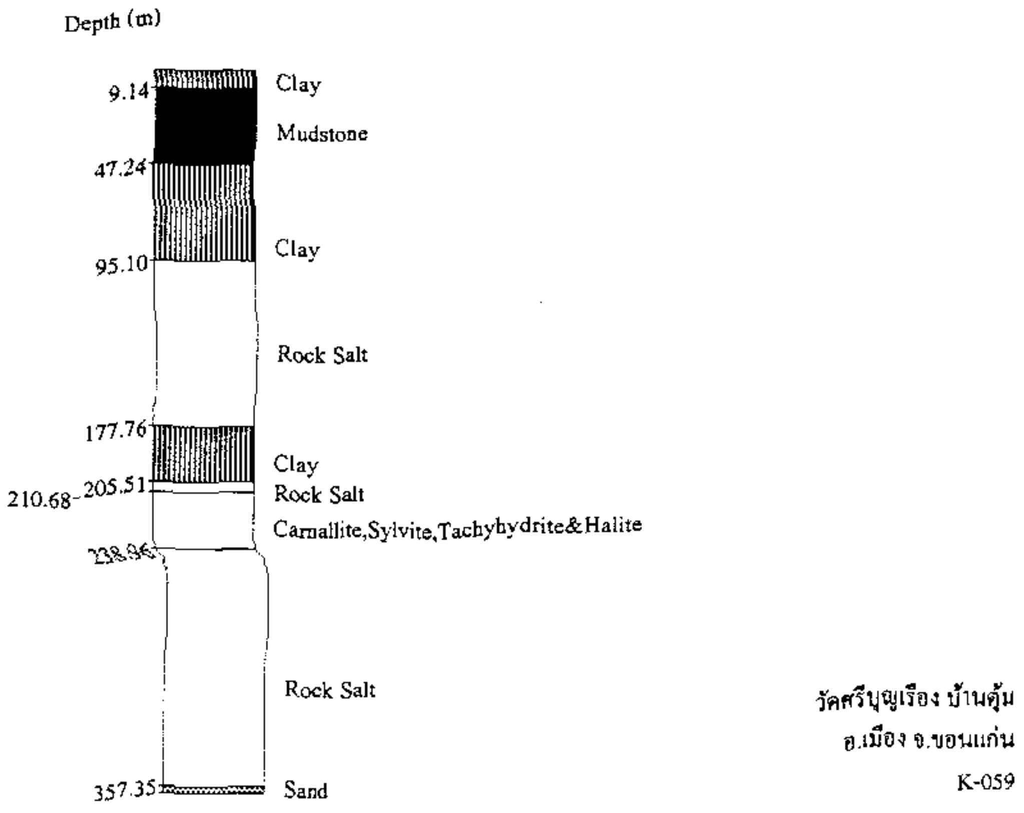


รูปที่ ผ-36 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-053 วัดป่าอรัญวาสี บ้านเหล่านาดี อ.เมือง จ.ขอนแก่น

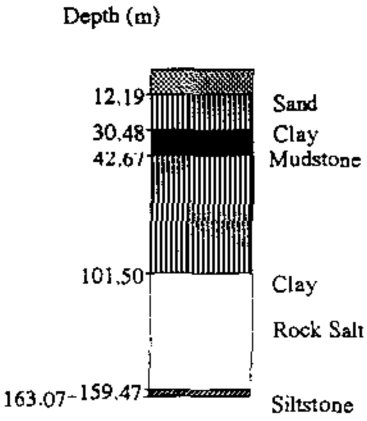


วัดชัยศรี บ้านสวัทถี
อ.เมือง จ.ขอนแก่น
K-054

รูปที่ ผ-37 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-054 วัดชัยศรี บ้านสวัทถี อ.เมือง จ.ขอนแก่น

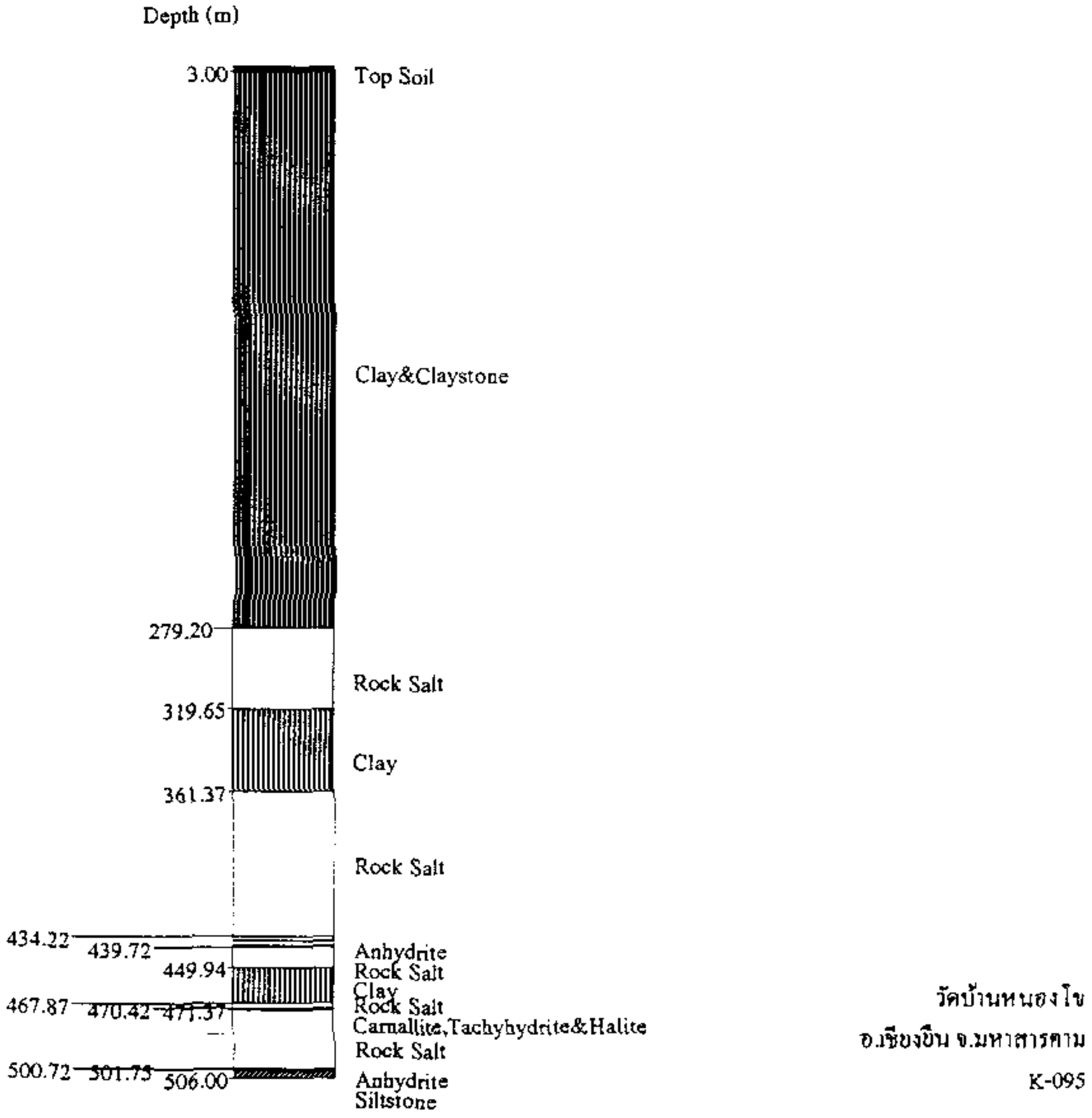


รูปที่ ผ-38 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-059 วัดศรีบุญเรือง บ้านคุ้ม อ.เมือง จ.ขอนแก่น

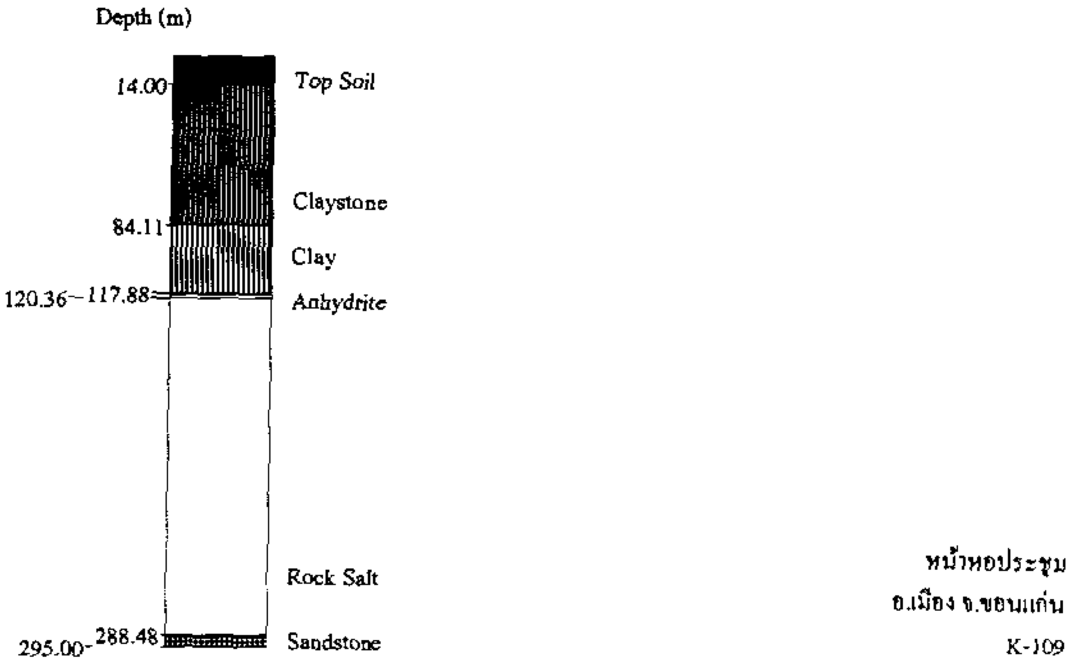


วัดโพธิ์ชัย บ้านนาข่า
อ.มัญจาคีรี จ.ขอนแก่น
K-063

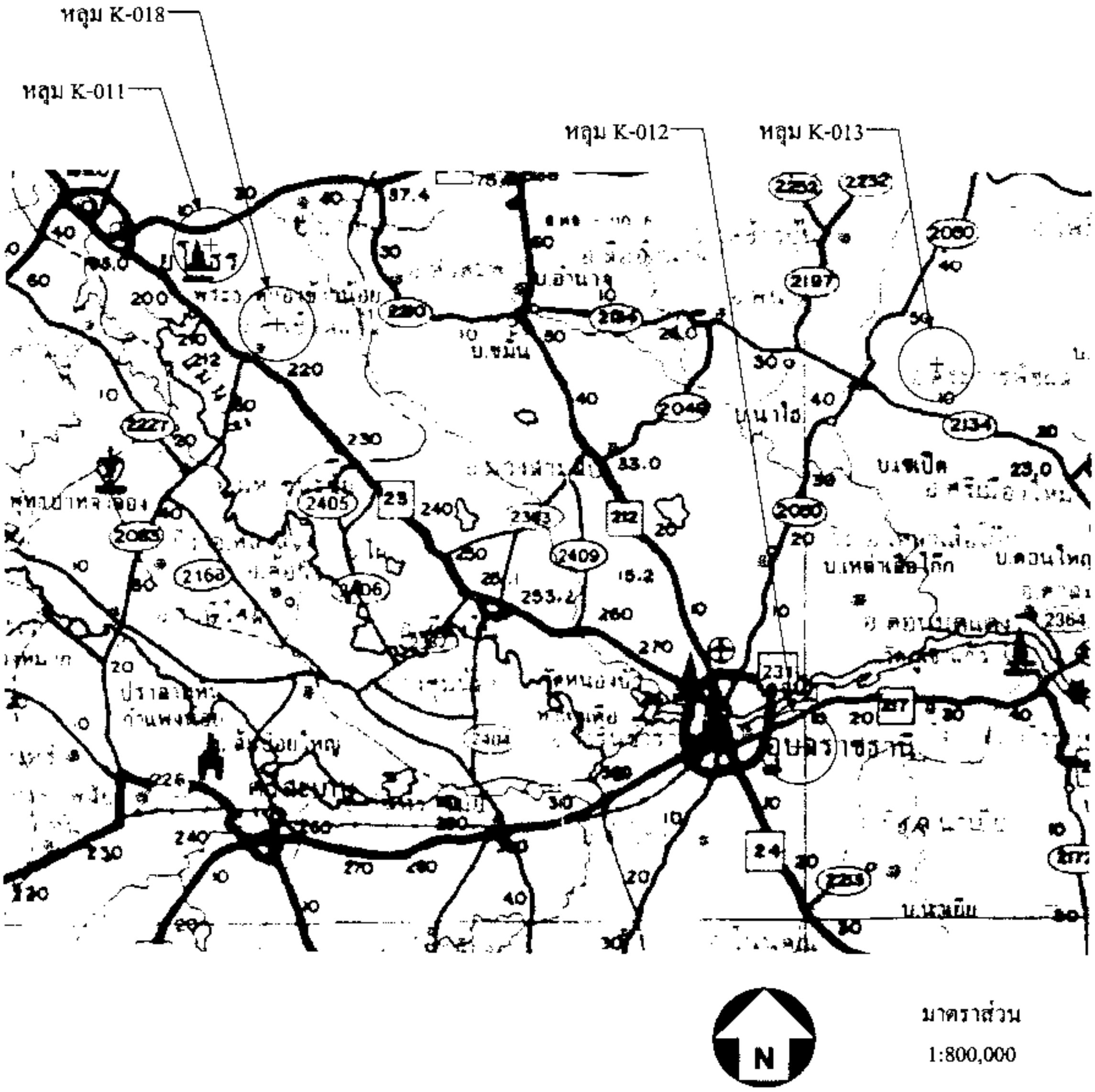
รูปที่ ผ-39 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-063 วัดโพธิ์ชัย บ้านนาข่า อ.มัญจาคีรี จ.ขอนแก่น



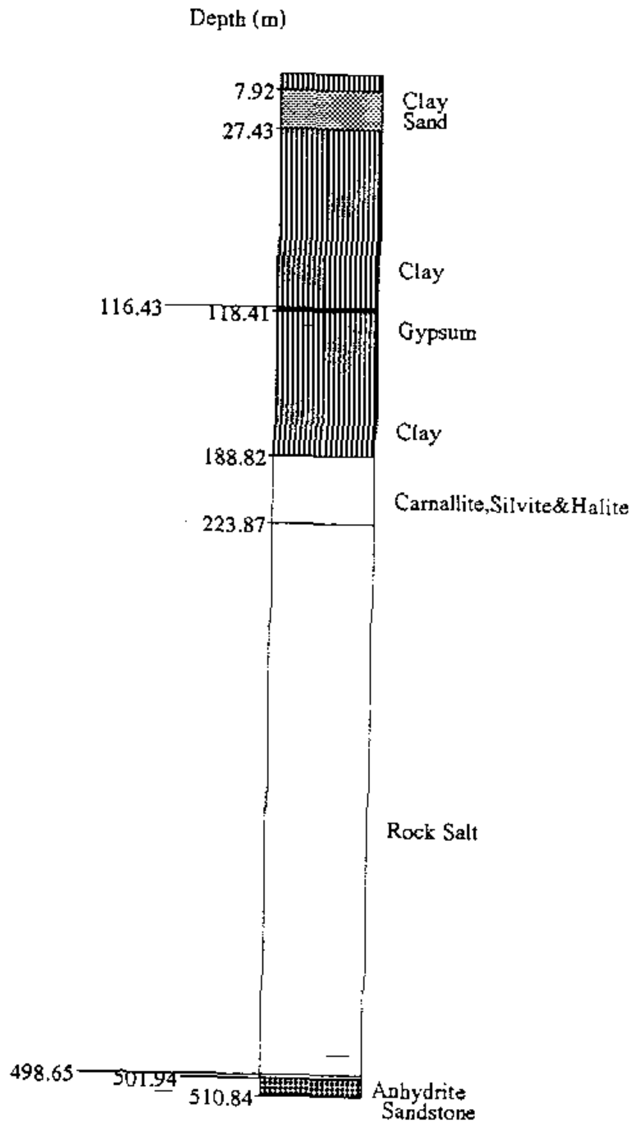
รูปที่ ผ-40 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-095 วัดบ้านหนองโข อ.เชียงยืน จ.มหาสารคาม



รูปที่ ผ-41 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-109 หน้าหอประชุม อ.เมือง จ.ขอนแก่น

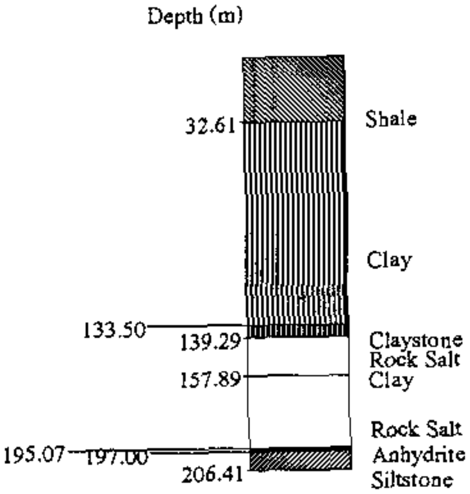


รูปที่ ผ-42 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-011, K-012, K013 และ K-018
สำหรับรูปที่ ผ-43 ถึงรูปที่ ผ-46



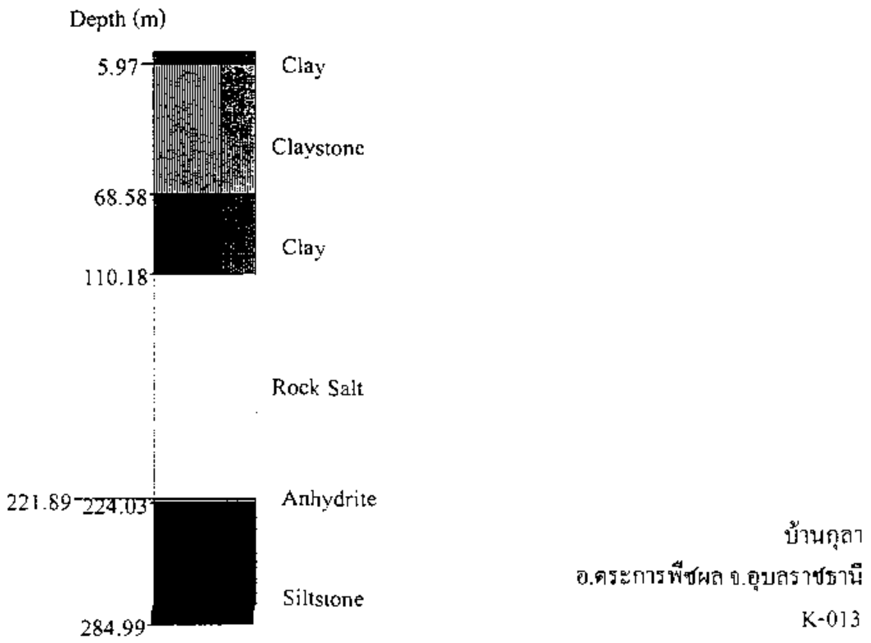
วัดไทยศรีมงคล
อ.เมือง จ.ยโสธร
K-011

รูปที่ ผ-43 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-011 วัดไทยศรีมงคล อ.เมือง จ.ยโสธร

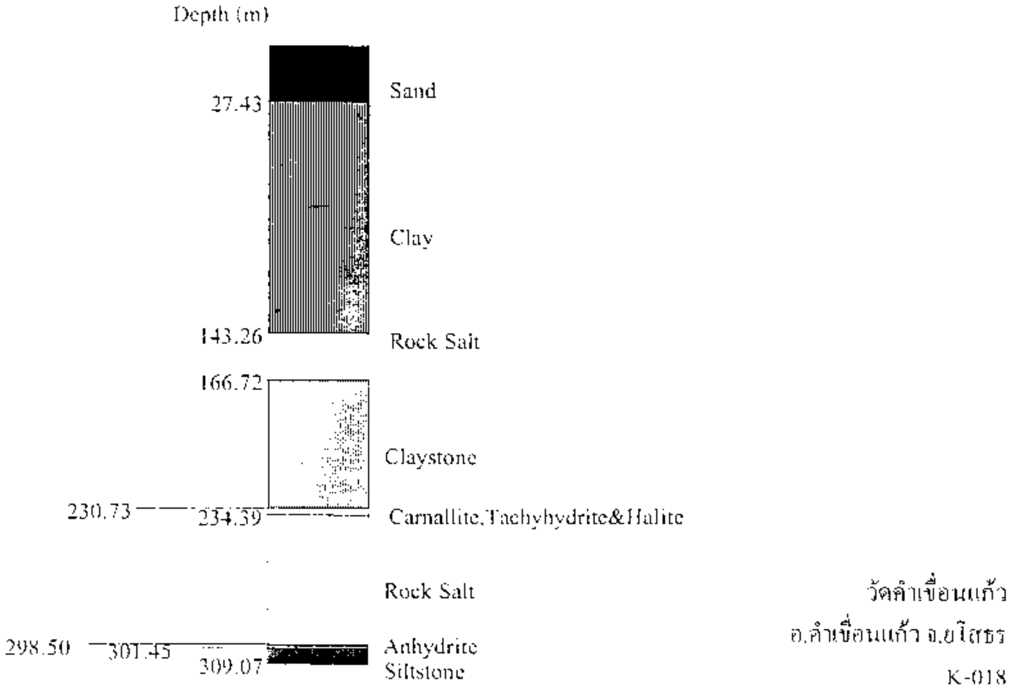


บ้านนาควาย
อ.เมือง .อุบลราชธานี
K-012

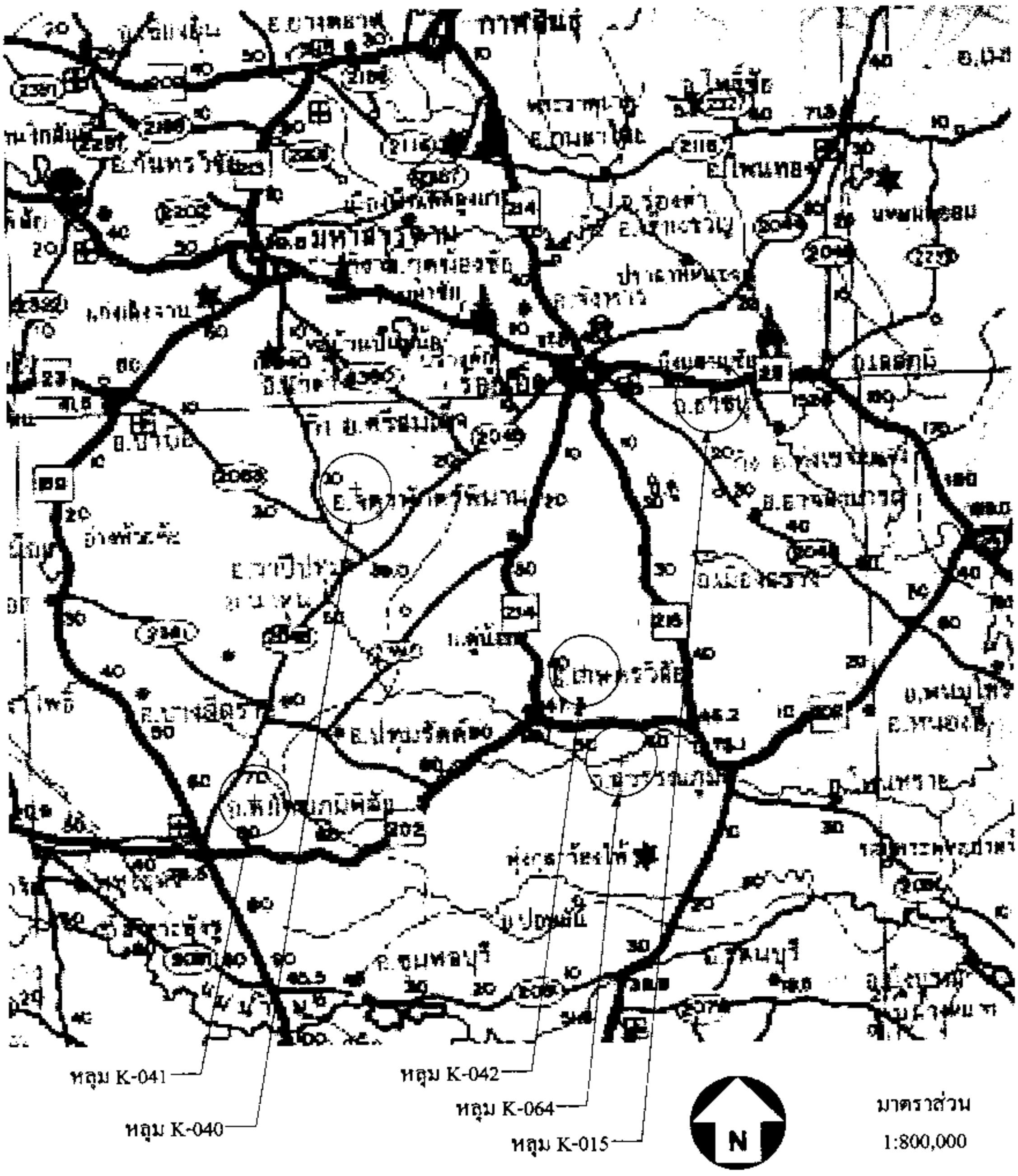
รูปที่ ผ-44 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-012 บ้านนาควาย อ.เมือง จ.อุบลราชธานี



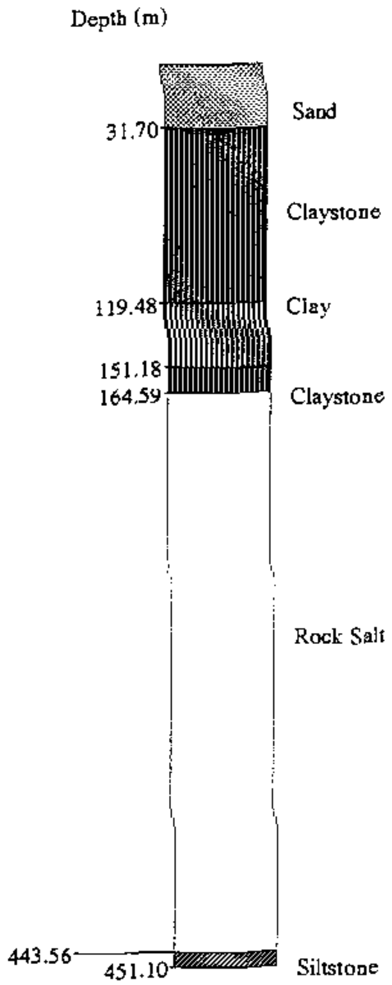
รูปที่ ผ-45 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-013 บ้านกุลา อ.ตระการพืชผล จ.อุบลราชธานี



รูปที่ ผ-46 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-018 วัดคำเขื่อนแก้ว อ.คำเขื่อนแก้ว จ.ยโสธร

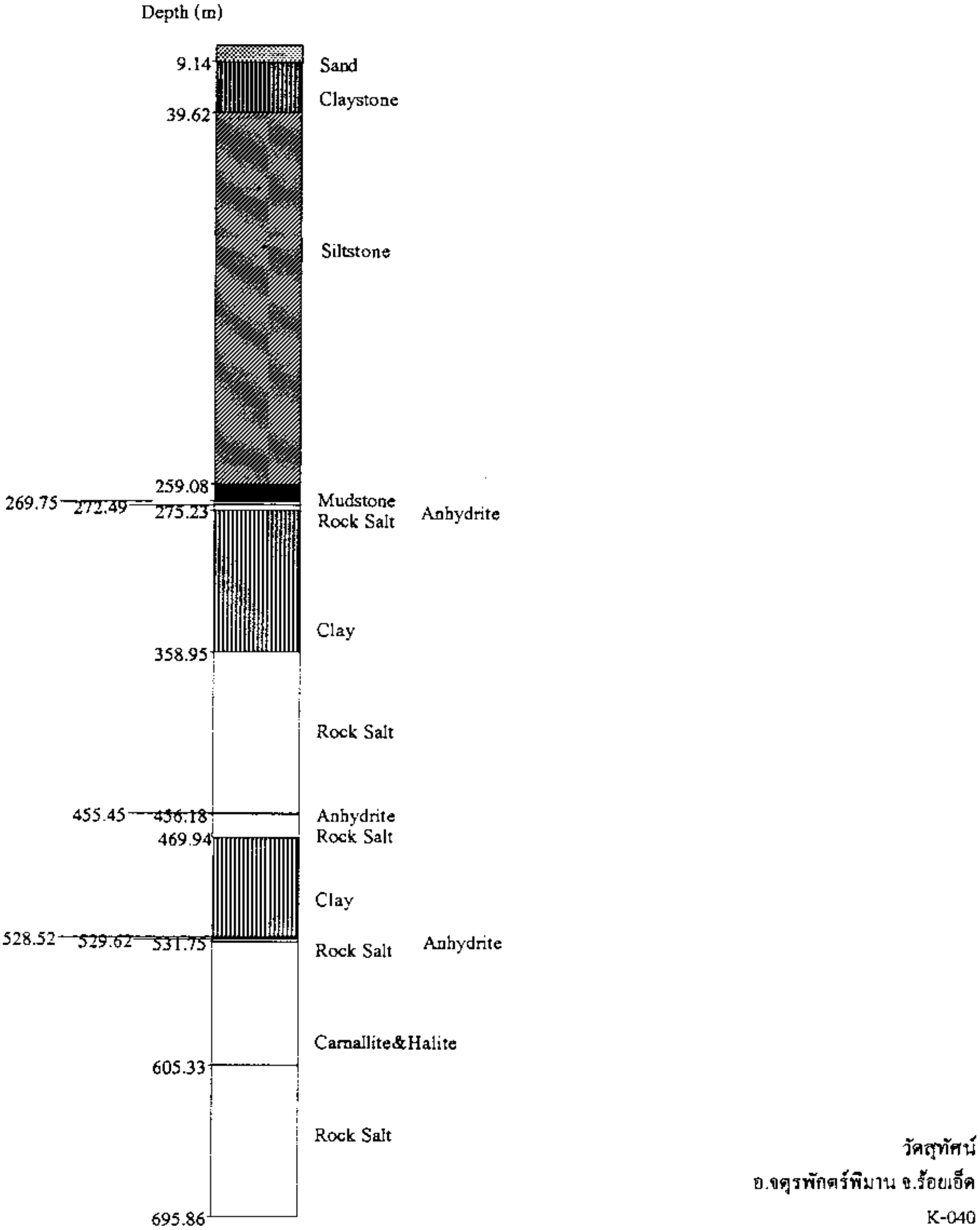


รูปที่ ผ-47 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-015, K-040, K-041, K-042 และ K-064 สำหรับรูปที่ ผ-48 ถึงรูปที่ ผ-52

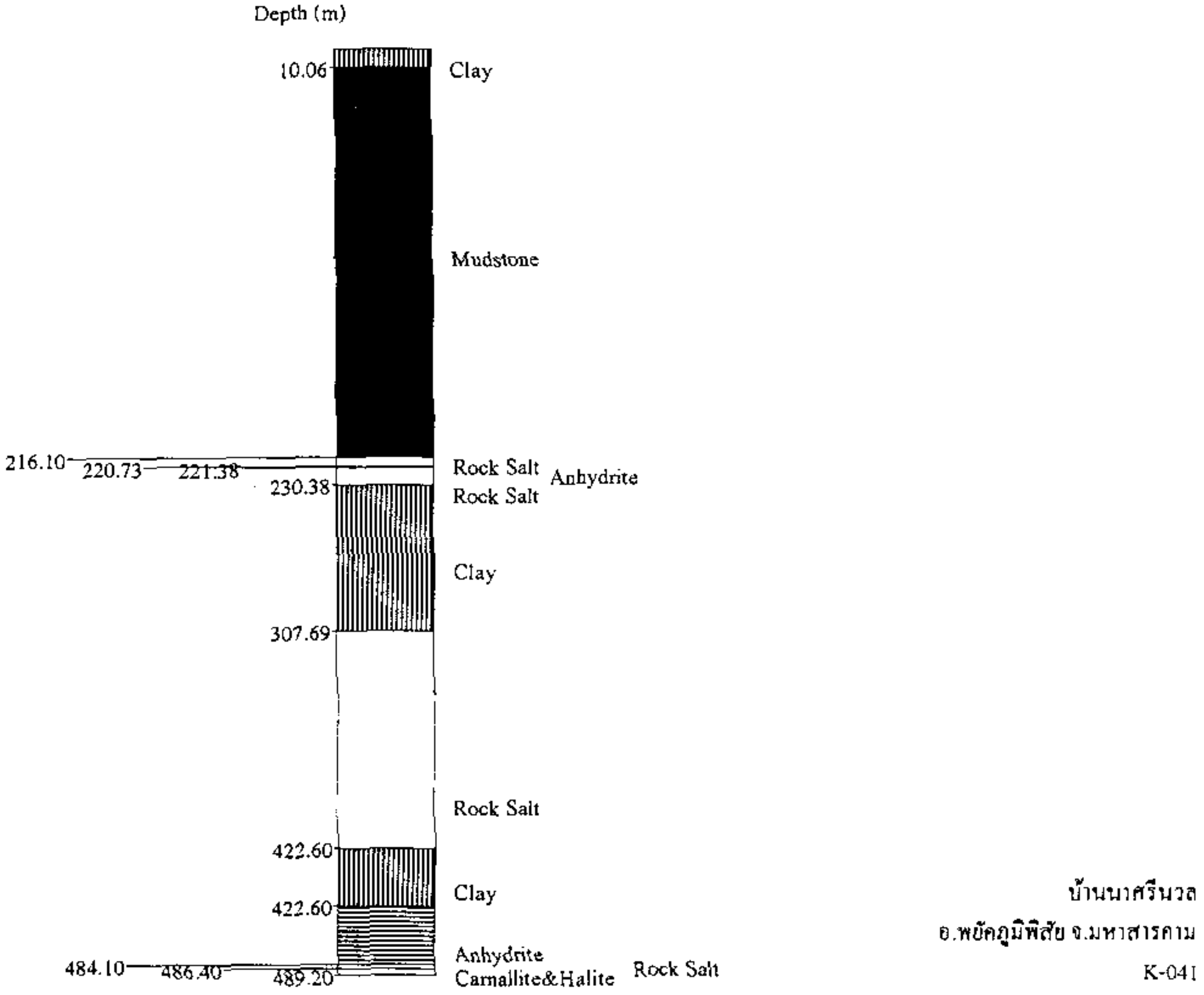


วัดบ้านคู่
อ.ธวัชบุรี จ.ร้อยเอ็ด
K-015

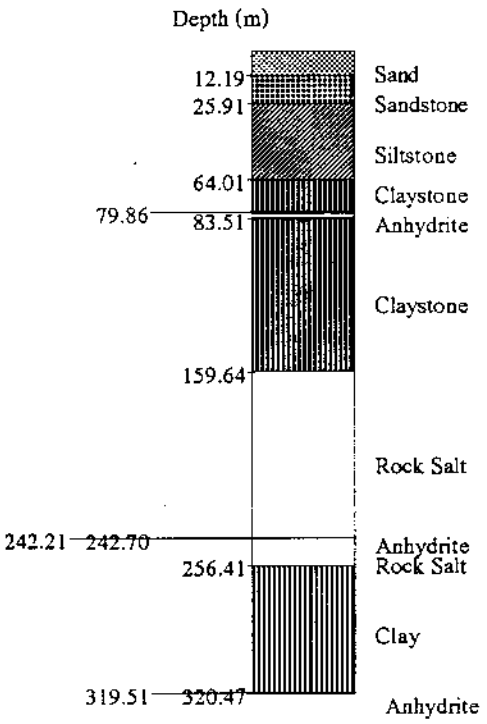
รูปที่ ผ-48 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-015 วัดบ้านคู่ อ.ธวัชบุรี จ.ร้อยเอ็ด



รูปที่ ผ-49 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-040 วัดสุทัศน์ อ.จตุรพักตร์พิมาน จ.ร้อยเอ็ด

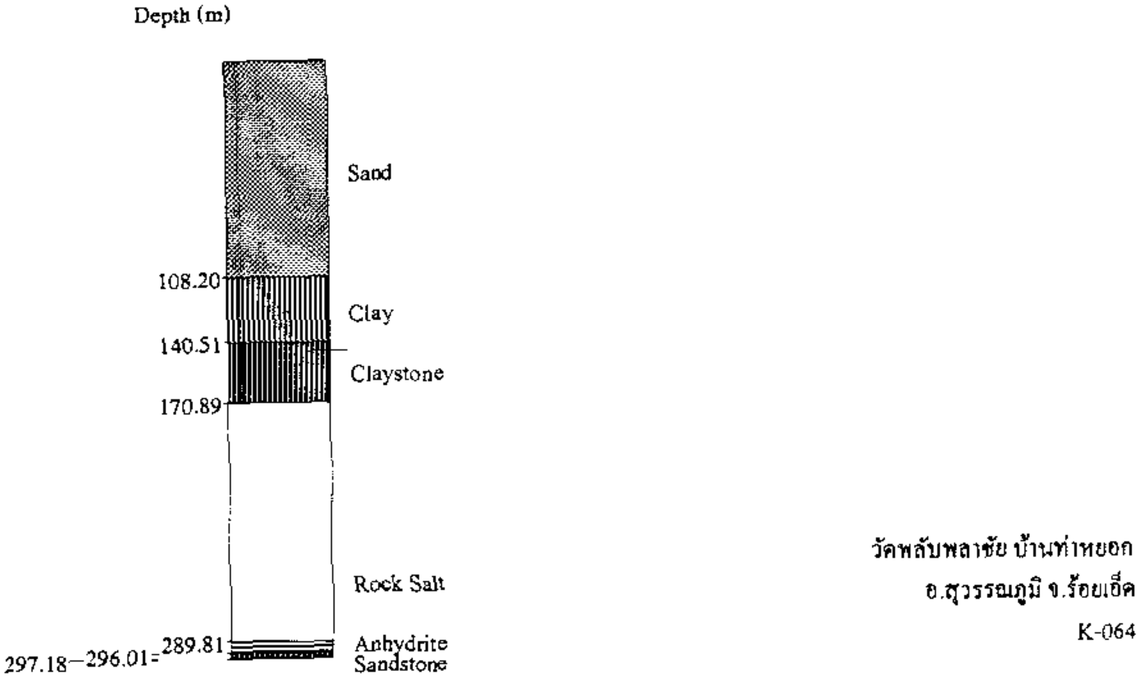


รูปที่ ผ-50 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-041 บ้านนาศรีนวล อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม

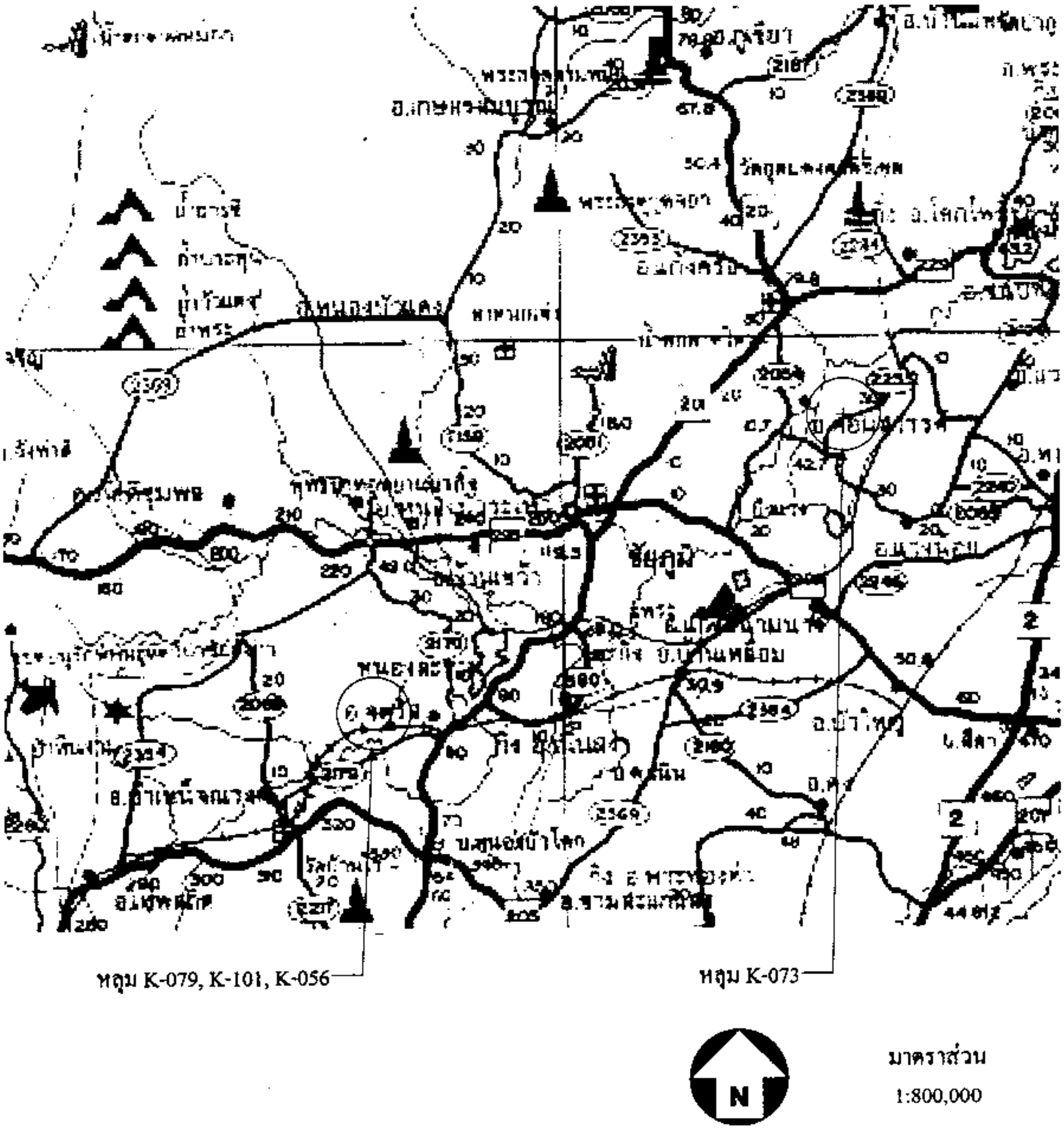


วัดธาตุ
อ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด
K-042

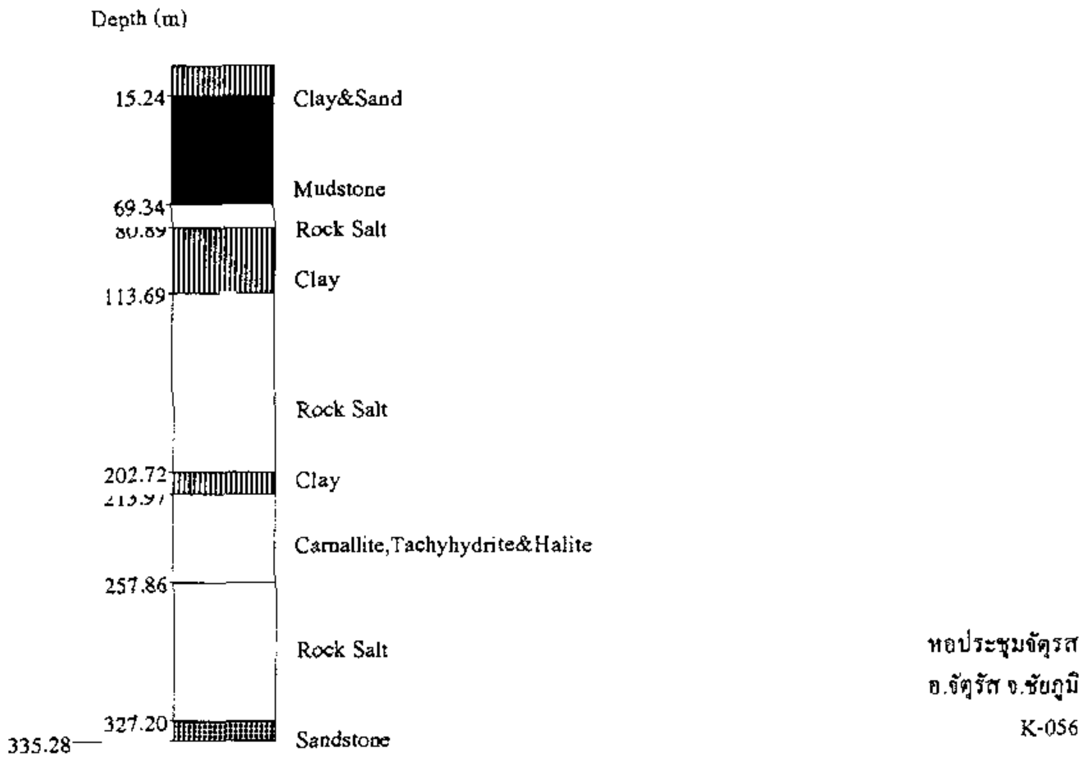
รูปที่ ผ-51 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-042 วัดธาตุ อ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด



รูปที่ ผ-52 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-064 วัดพลับพลาชัย บ้านท่าหยอก อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด

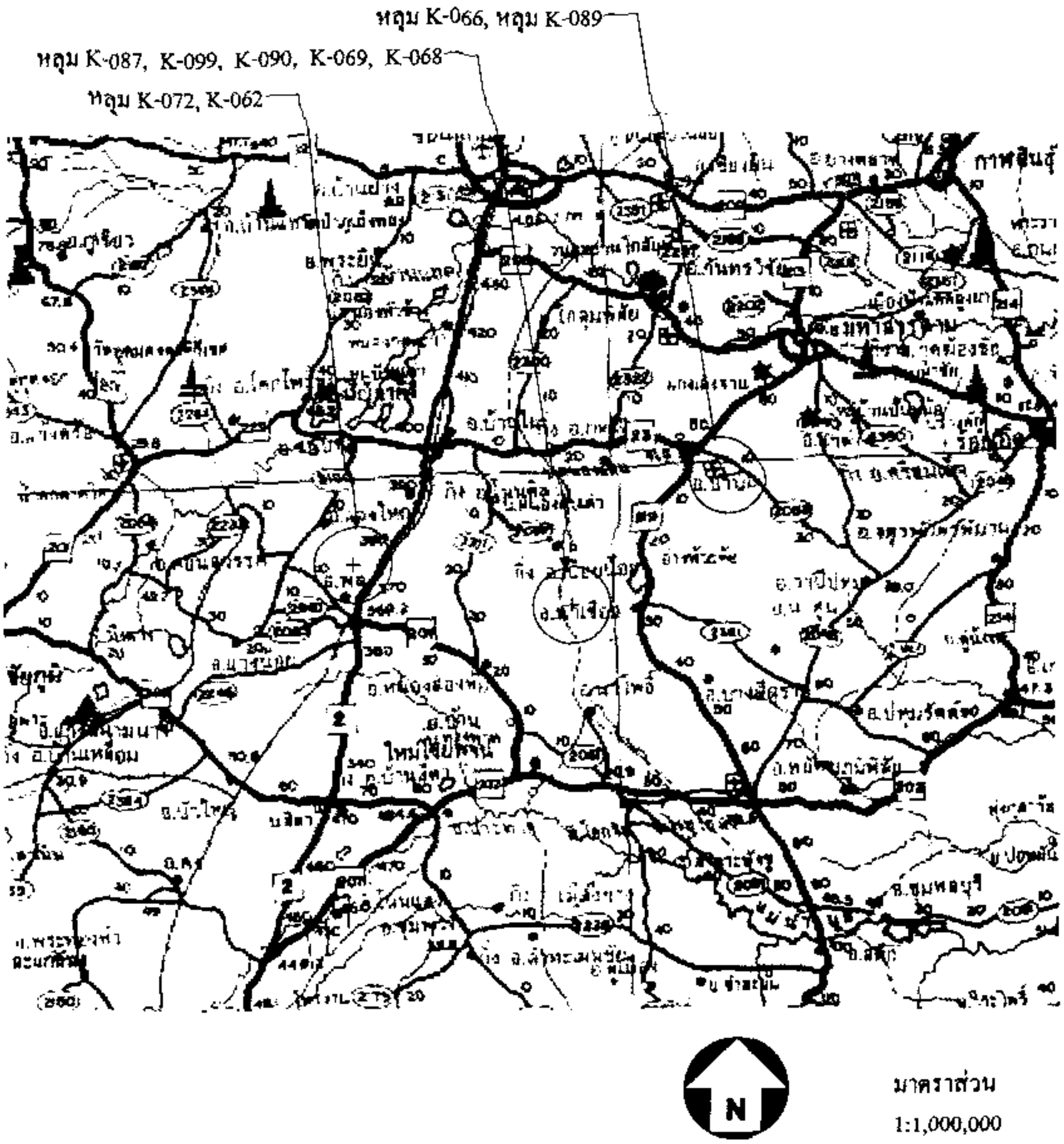


รูปที่ ผ-53 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-056 และ K-073 สำหรับรูปที่ ผ-54 และรูปที่ ผ-55

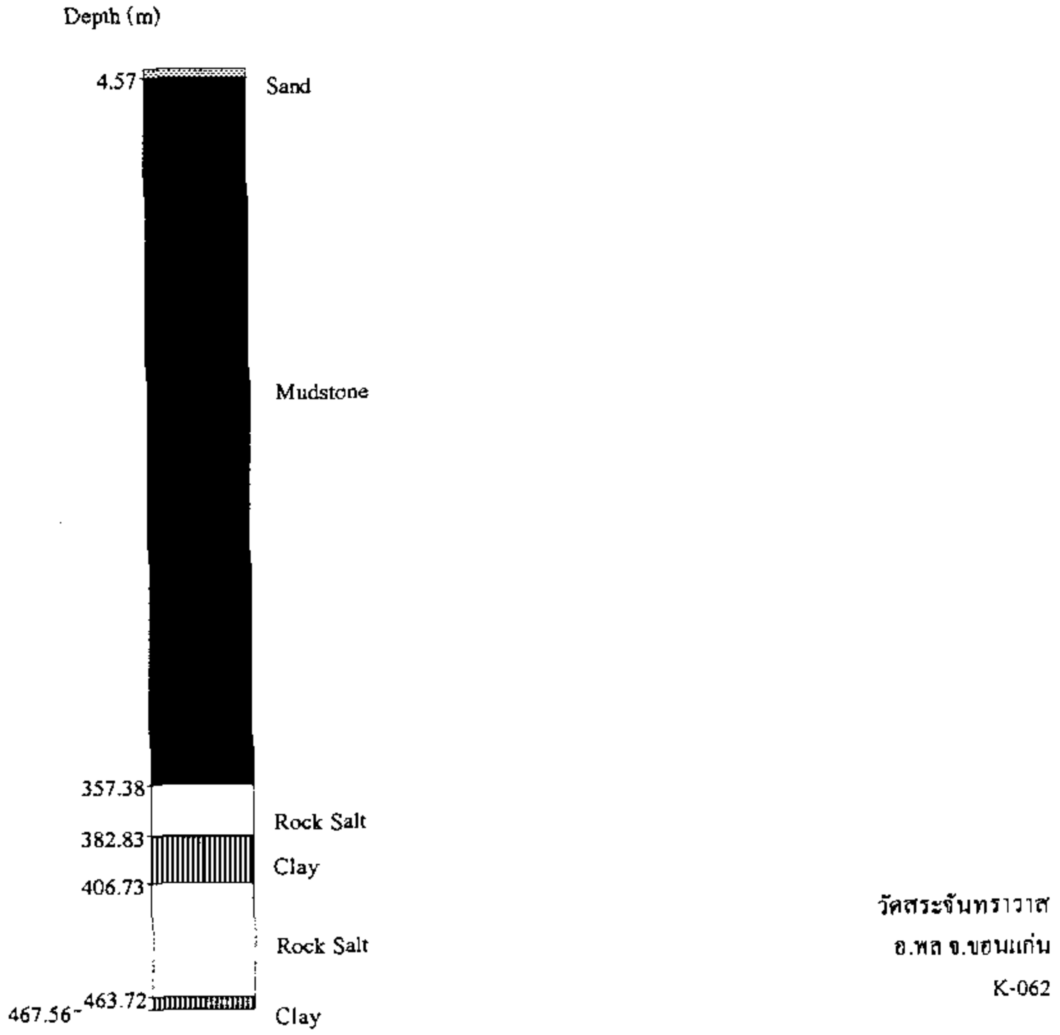


รูปที่ ผ-54 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-056 หอประชุมจัตุรัส อ.จัตุรัส จ.ชัยภูมิ

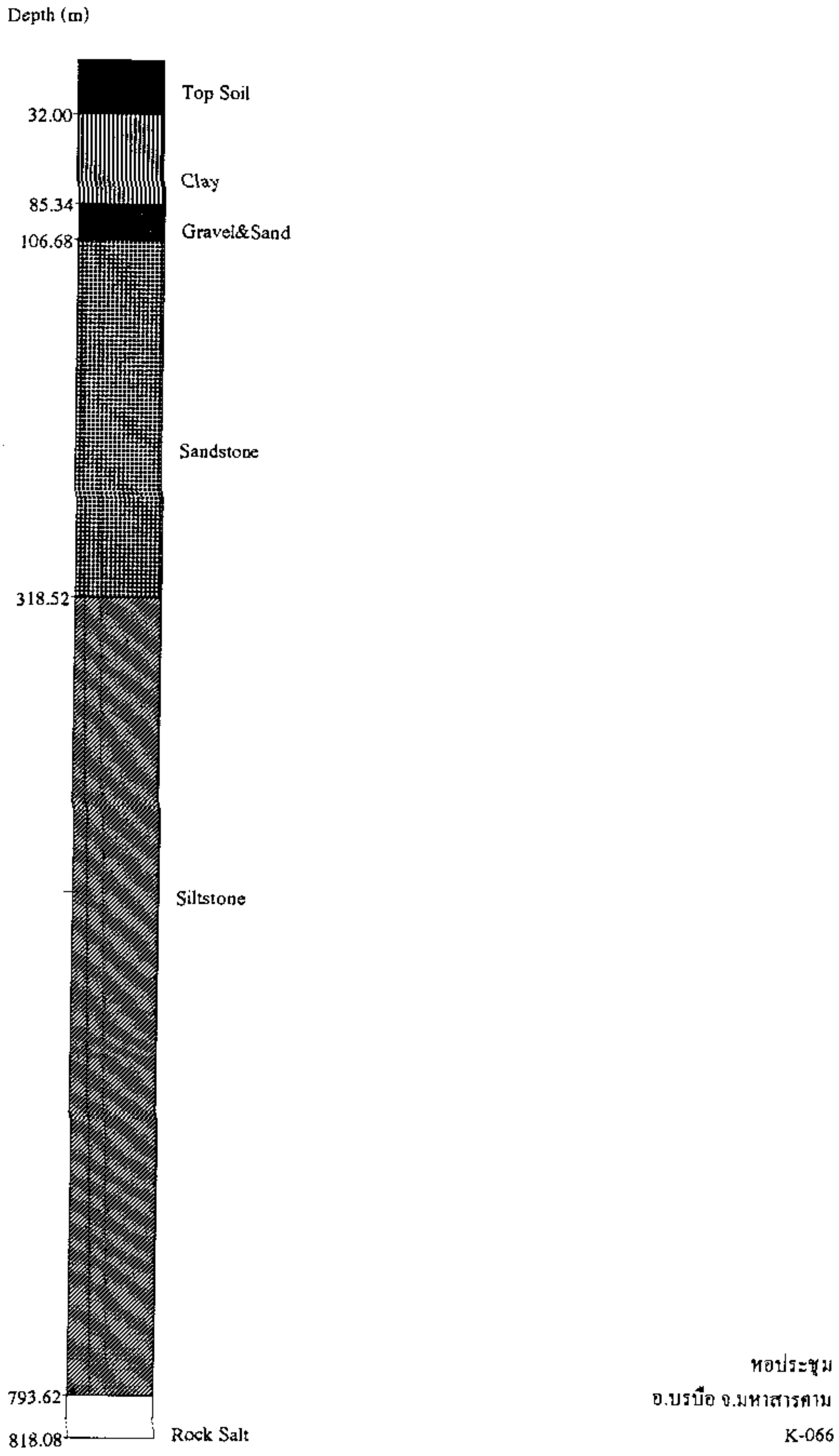
รูปที่ ผ-55 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-073 บ้านท่าช้าง อ.คอนสวรรค์ จ.ชัยภูมิ



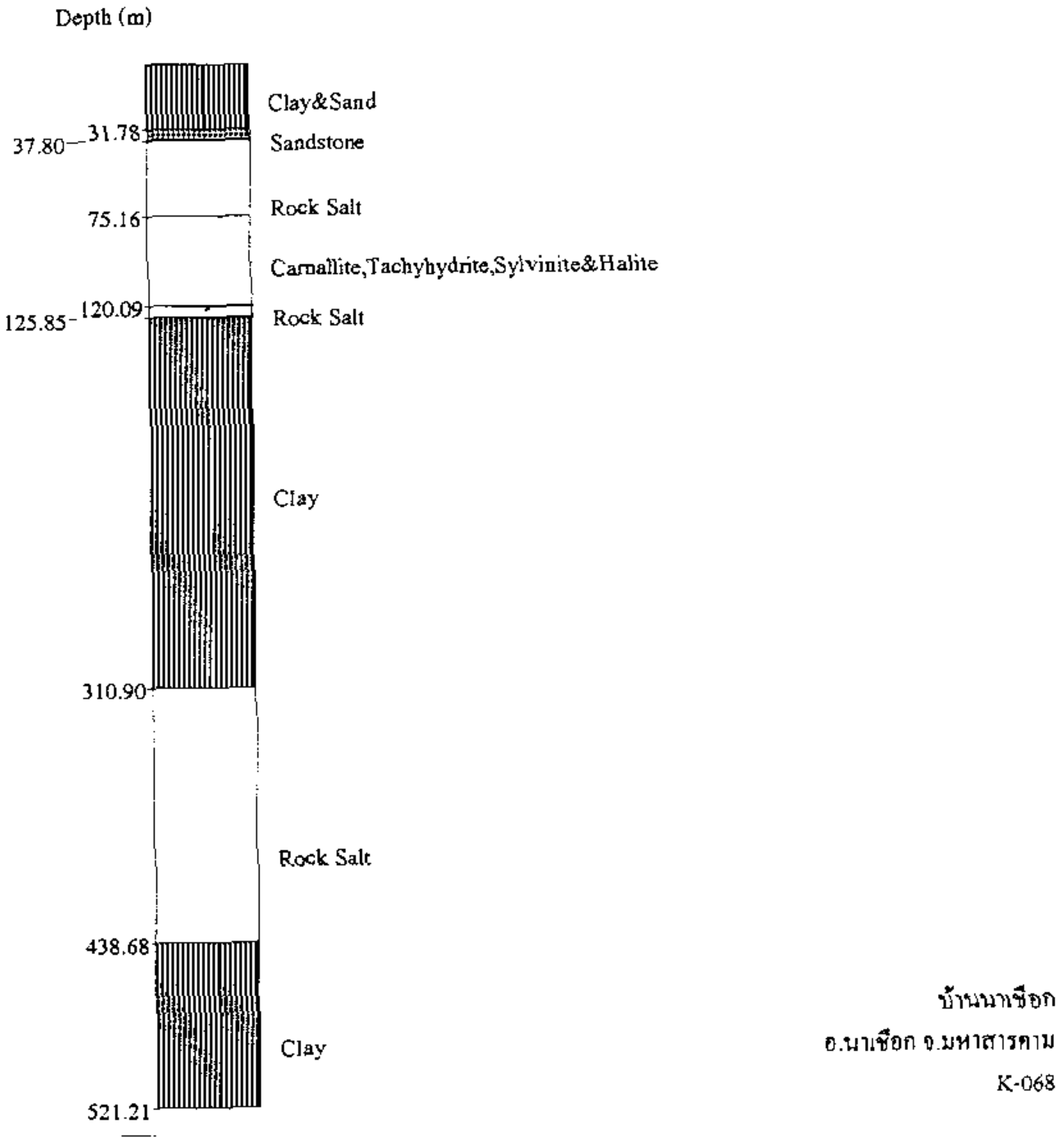
รูปที่ ผ-56 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมสำรวจ K-062, K-066, K-068, K-069, K-072, K-087, K-089 และ K-090 สำหรับรูปที่ ผ-57 ถึงรูปที่ ผ-64



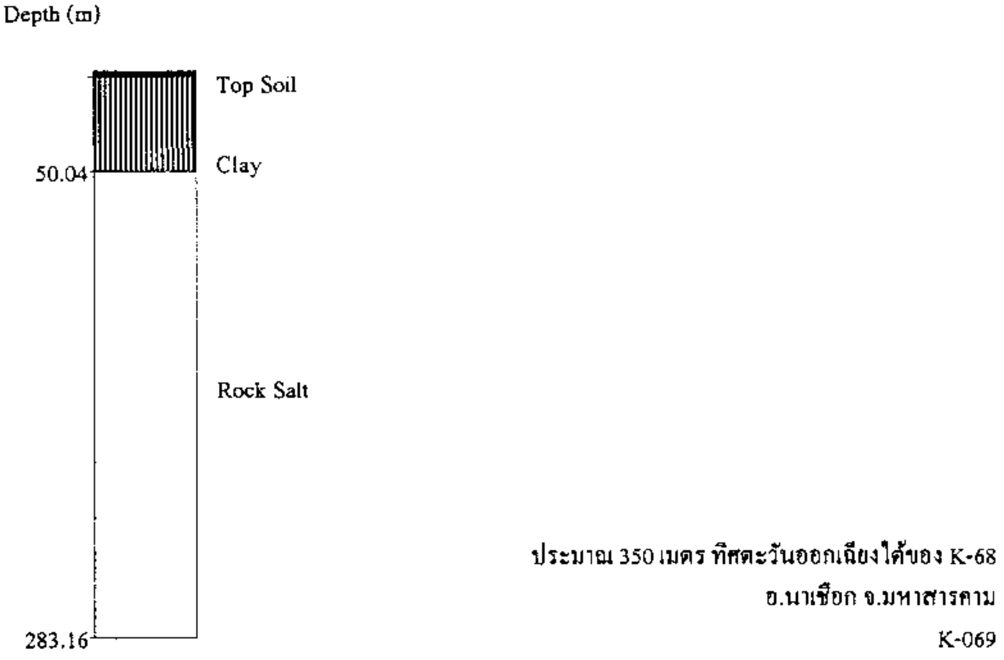
รูปที่ ผ-57 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-062 วัดสระจันทราวาส อ.พล จ.ขอนแก่น



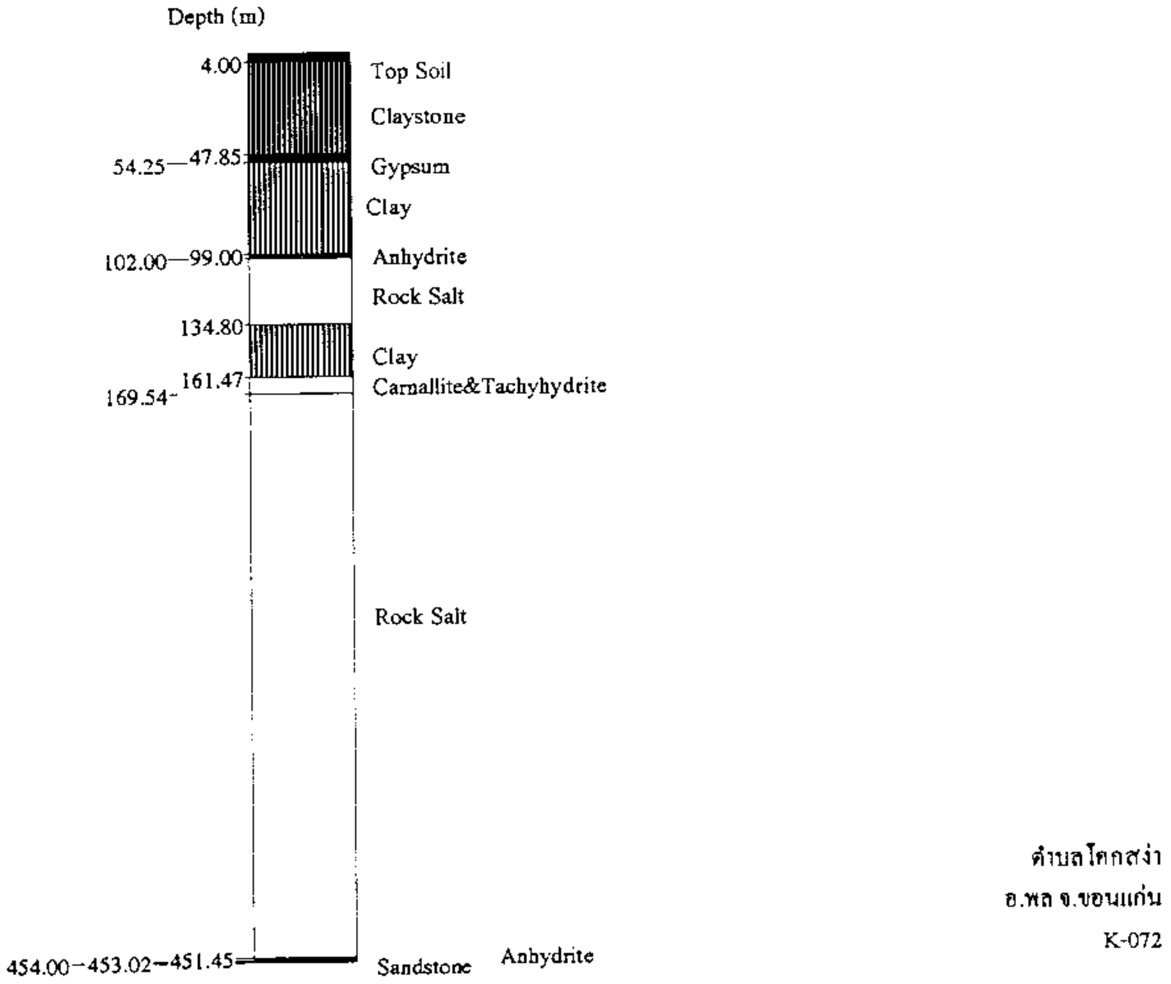
รูปที่ ผ-58 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-066 หอประชุม อ.บรบือ จ.มหาสารคาม



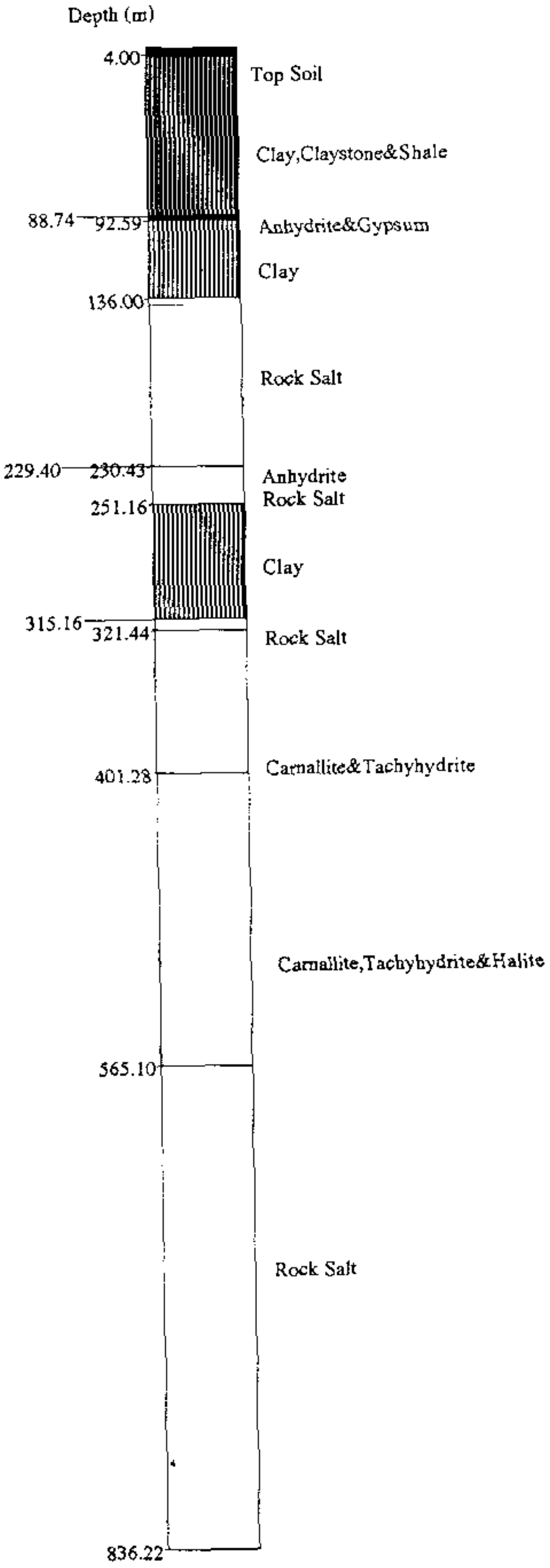
รูปที่ ผ-59 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-068 บ้านนาเชือก อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม



รูปที่ ผ-60 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-069 ประมาณ 350 เมตร ทิศตะวันออกเฉียงใต้ของ K-68 อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม

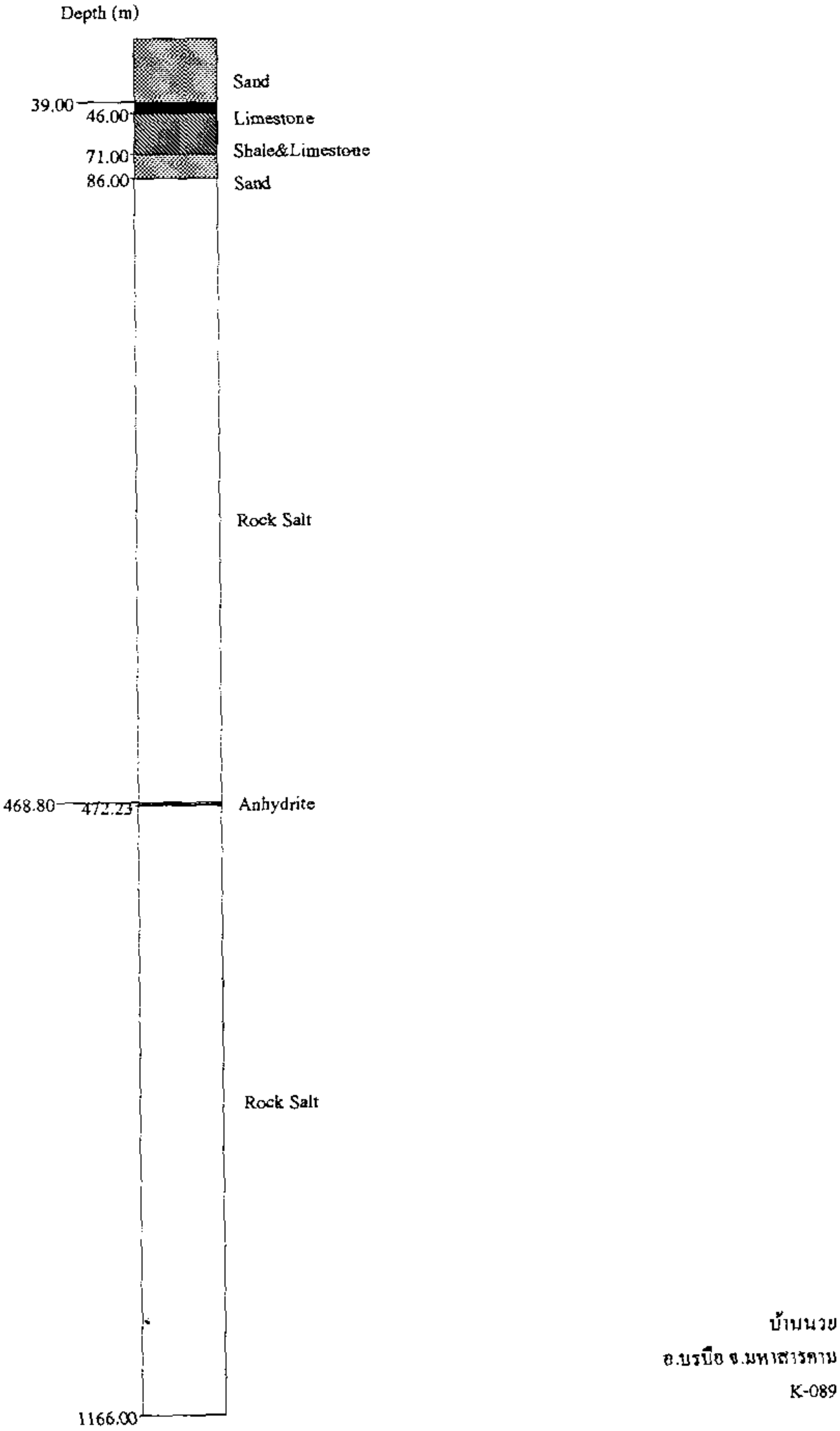


รูปที่ ผ-61 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-072 ต.โคกสง่า อ.พล จ.ขอนแก่น

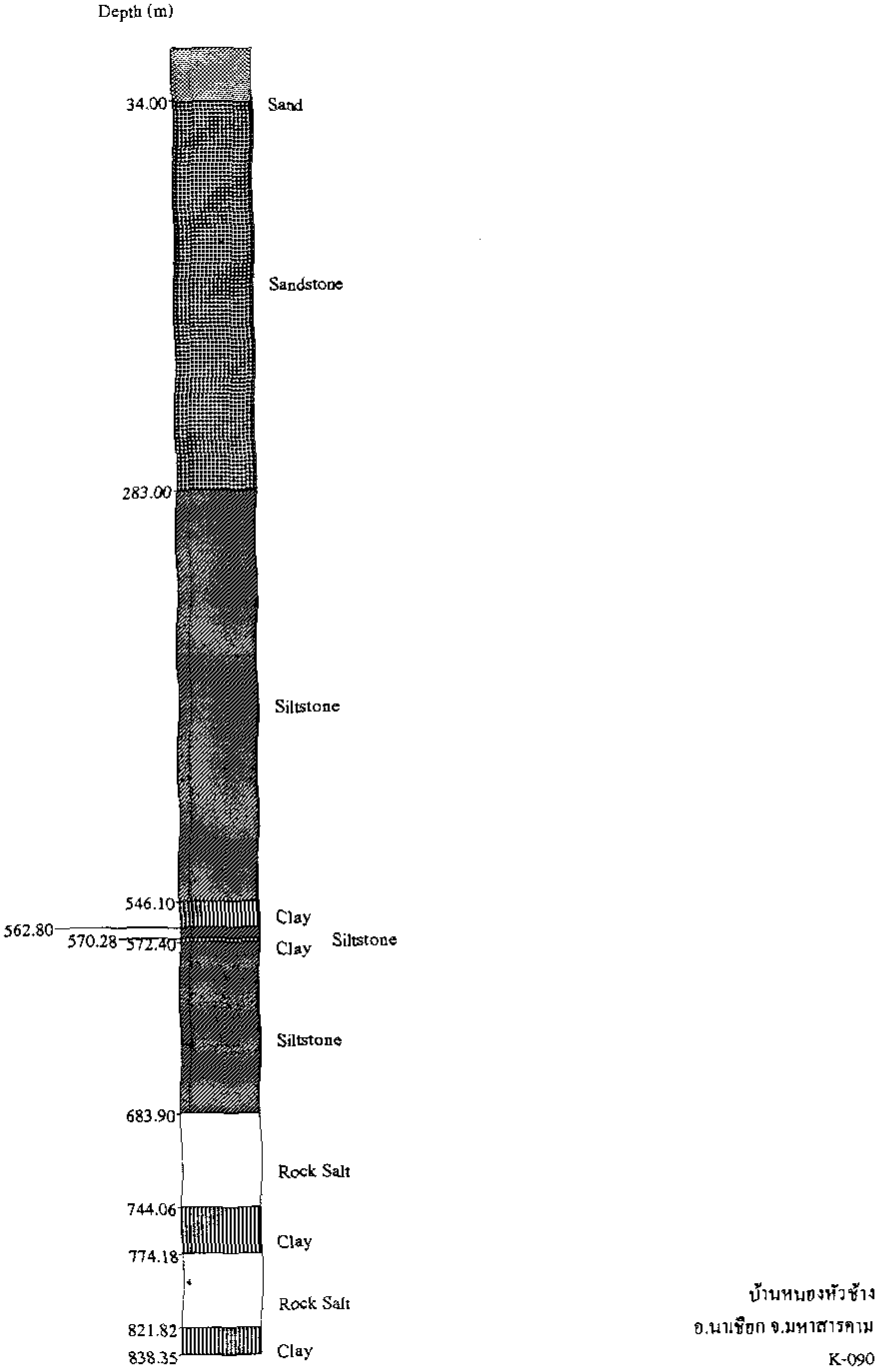


บ้านโพธิ์พาน
อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม
K-087

รูปที่ ผ-62 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-087 บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม



รูปที่ ผ-63 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-089 บ้านนวย อ.บรบือ จ.มหาสารคาม



รูปที่ ผ-64 ลำดับชั้นหินหลุมสำรวจ K-090 บ้านหนองหัวช้าง อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม

ประวัตินักวิจัย

ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในสาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา "Scaling of Boreholes and Underground Excavations in Rock" ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelp Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอแลนด์