

วารสารเกษตร 19 (1) : 1-11 (2546)

Journal of Agriculture 19 (1) : 1-11 (2003)

ผลกระทบของถนนและการเปลี่ยนแปลงสิ่งปกคลุมดิน  
ต่อสภาพทางอุทกวิทยาและการชะล้างพังทลายของดิน  
ในพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็กเขตภูเขาในภาคเหนือของประเทศไทย

Hydrological and Erosional Impacts of Road  
and Land-Cover Change in Small Mountainous Watershed  
in Northern Thailand

อลัน ดี ซิกเลอร์<sup>1/</sup> โทมัส ดับเบิลยู กีแอมเบลลูกา<sup>1/</sup> รอสส์ เอ ซัทเธอร์แลนด์<sup>1/</sup> ไมค์ นุลเลต<sup>1/</sup>  
จิตติ ปิ่นทอง<sup>2/</sup> เสน่ห์ ญาณสาร<sup>3/</sup> โทมัส วานา<sup>1/</sup> และสธพร ใจอารีย์<sup>4/</sup>  
*Alan D. Ziegler<sup>1/</sup>, Thomas W. Giambelluca<sup>1/</sup>, Ross A. Sutherland<sup>1/</sup>, Mike Nullet<sup>1/</sup>,  
Jitti Pinthong<sup>2/</sup>, Sanay Yarnasarn<sup>3/</sup>, Thomas Vana<sup>1/</sup>, and Sathaporn Jaiarree<sup>4/</sup>*

**Abstract:** Through fieldwork in northern Thailand, a realistic assessment of hydrological and geomorphological impacts of roads in mountainous tropical watersheds was carried out. Findings from field rainfall simulations, surveys of road and traffic phenomena, and computer simulations are presented. Because roads generate Horton

<sup>1/</sup>ภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮาวาย สหรัฐอเมริกา

<sup>2/</sup>ภาควิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

<sup>3/</sup>ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

<sup>4/</sup>กองอนุรักษ์ดินและน้ำ กรมพัฒนาที่ดิน กรุงเทพฯ 109000

<sup>1/</sup>Department of Geography, University of Hawaii, Honolulu, HI USA 96822 (contact [adz@hawaii.edu](mailto:adz@hawaii.edu))

<sup>2/</sup>Department of Soil Science and Conservation, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand.

<sup>3/</sup>Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand.

<sup>4/</sup>Soil and Water Conservation Division, Land Development Department, Bangkok 10900, Thailand.

overland flow (HOF) during most rain events, they transport sediment into the stream system throughout the rainy season. Linkage of road sections via rut and gully systems allow them to transport runoff generated in one basin into adjacent basins, where it may contribute to hydrological and erosional impacts. Footpaths, like roads, accelerate runoff, and may enhance field erosion by acting as source areas for surface runoff. Vehicle detachment and maintenance activities during interstorm periods increase the volume of loose material that can be removed by overland flow during subsequent rainstorms. Road sediment transport is simulated best when the surface layer of loose sediment is explicitly modeled. This research serves as a foundation for future work aimed at quantifying road and agricultural contributions to cumulative watershed effects in South East Asia.

**บทคัดย่อ:** จากการปฏิบัติการศึกษาภาคสนามในภาคเหนือของประเทศไทย ได้ทำการประเมินผลกระทบทางอุทกวิทยา และธรณีสิ่งแวดล้อมวิทยาของถนนในบริเวณลุ่มน้ำบนภูเขา ผลการศึกษาจากการใช้ฝนเทียมในบริเวณที่ทำการศึกษากิจการสำรวจการใช้ถนนเครือข่าย และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ด้วยเหตุที่ถนนมักก่อให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดิน อันเนื่องมาจากการที่ความหนักเบาของฝนมีค่าเกินขีดความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านของดิน (Horton Overland Flow, HOF) ถนนจึงเป็นแหล่งน้ำตะกอนลงสู่ระบบทางน้ำลำธาร โดยเฉพาะฤดูฝน ทางเชื่อมโยงของถนนที่ตัดผ่านระหว่างทางรถและห้วยหรือร่องลึกเป็นสาเหตุหนึ่งในการนำน้ำไหลบ่าที่เกิดจากลุ่มน้ำหนึ่งไปสู่ลุ่มน้ำหนึ่งที่อยู่ใกล้เคียง และก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านอุทกวิทยาและการชะล้างพังทลาย เช่นเดียวกับกับถนนทางเดินเท้า เป็นตัวเร่งให้เกิดน้ำไหลบ่าและช่วยให้เกิดการกัดเซาะที่จุดนั้นมากขึ้นเช่นกัน พื้นผิวถนนซึ่งได้มีร่องอยู่เสมอ ตลอดจนการซ่อมบำรุงรักษาในแต่ละปีทำให้ปริมาณของตะกอนที่ถูกน้ำบ่าหน้าดินพัดพาไปมีมากขึ้น การจำลองสถานการณ์ทำได้ดีที่สุดเมื่อการจำลองชั้นพื้นผิวของเศษตะกอนเป็นไปอย่างถูกต้อง การวิจัยนี้จะใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการค้นคว้าต่อไปในเรื่องของผลกระทบสะสมของถนนและการเกษตรกรรมที่มีต่อตะกอนจากพื้นที่ลุ่มน้ำในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

**Index words:** ถนนดิน การจำลองสถานการณ์การกัดกร่อนดิน การเสื่อมโทรมของที่ดิน อุทกวิทยาเขตร้อน/ธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม unpaved roads, erosion modeling, land degradation, tropical hydrology/geomorphology

## คำนำ

การทำไร่เลื่อนลอยตามพื้นที่ภูเขาทางภาคเหนือของประเทศไทยที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงก่อนสิบปีที่ผ่านมา ได้ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านอุทกวิทยาและการสะสมของตะกอนตามระบบทางน้ำสำคัญๆ รวมทั้งในแม่น้ำเจ้าพระยา ในการแก้ไขปัญหานี้โครงการอนุรักษ์แหล่งน้ำทั้งของนานาชาติ

และของประเทศไทยเองต่างมักจะมุ่งไปที่การปรับปรุงรูปแบบการเกษตรกรรมของชนกลุ่มน้อย (ชาวเขา) ที่อาศัยอยู่ตามลุ่มน้ำในพื้นที่สูง แม้ว่าการเพาะปลูกที่ไม่เหมาะสมในพื้นที่ลาดเขาที่สูงชันจะเป็นตัวการที่สำคัญในการก่อให้เกิดผลกระทบในบางพื้นที่ การก่อสร้างขยายเครือข่ายถนนก็อาจจะเป็นตัวการที่สำคัญพอๆ กัน หรือสำคัญยิ่งไปกว่านั้นก็ได้ การศึกษาทางแถบตะวันตกเฉียงเหนือ

ของฝั่งมหาสมุทรแปซิฟิกของสหรัฐอเมริกา และในออสเตรเลียชี้ให้เห็นว่าผลกระทบที่เกิดจากถนนอาจมีมากกว่ากิจกรรมอื่นๆ ในพื้นที่ลุ่มน้ำ และก่อให้เกิดความเสียหายดังที่ได้ทราบมาก่อนหน้านี้แล้ว (Megahan and Kidd, 1972; Grayson *et al.*, 1993; Megahan and Ketcheson, 1996)

ในภาคเหนือของประเทศไทยได้มีการก่อสร้างถนนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา แต่การศึกษาผลกระทบจากถนนที่มีต่อสภาพแวดล้อมยังมีน้อยมาก (จำนงค์, 2526; Van der Plas and Bruijnzeel, 1993) เมื่อเทียบกับการศึกษาผลกระทบของถนนในเขตอบอุ่น งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงปฏิบัติการภาคสนามและการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความมุ่งหมายที่จะประเมินผลกระทบเชิงปริมาณทางด้านอุทกวิทยาและการชะล้างพังทลายของดินอันเป็นผลเนื่องมาจากการก่อสร้างและขยายเครือข่ายถนน

## วิธีการศึกษา

### 1. ที่ตั้งและลักษณะพื้นที่

การทดลองภาคสนามอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำบ้านปางชุม (PKEW; ภาพที่ 1B) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำคานที่น้ำไหลลงสู่แม่น้ำปิงและไหลลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาอีกต่อหนึ่ง มีพื้นที่ประมาณ 585 ไร่ ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่เป็นหินแกรนิตยุคไทรแอสสิกดินที่พบส่วนใหญ่อยู่ในอันดับ Ultisols และ Inceptisols มีพบบ้างเป็นส่วนน้อย สัดส่วนของถนนทางสัญจร และที่อยู่อาศัย มีน้อยกว่า 1 % ของพื้นที่ของลุ่มน้ำศึกษา ส่วนบริเวณทำการเพาะปลูกพืชไร่บนที่สูง และไร่หมุนเวียนที่ทิ้งร้างไม่ถึงปีครึ่งมีสัดส่วนประมาณ 12 %; อีก 13 % เป็นที่ดินที่ทิ้งไว้เพื่อให้ดินดีขึ้น (คือทิ้งไว้ประมาณ 1½ - 4 ปี); 31 % เป็นป่าทุติยภูมิอายุน้อย (4-10 ปี); 12 % เป็นป่าทุติย-

ภูมิเก่ากว่า (อายุมากกว่า 10 ปี) และอีก 31 % เป็นป่าธรรมชาติที่ถูกรบกวน

## 2. วิธีการ

### 1) การสำรวจใช้และวัดสมบัติทางกายภาพของถนน

(1) สำรวจจำนวนและชนิดยานพาหนะเป็นระยะเวลา 225 ชั่วโมงในระยะเวลา 44 วัน รวมทั้งสภาพถนนและอากาศว่าเป็นเช่นไร และมีโซ่ลมห้อยหรือไม่

(2) ประเมินลักษณะทางกายภาพรูปตัดของถนนในพื้นที่ลุ่มน้ำศึกษา ทั้งในช่วงบนและช่วงล่างทุกๆ 50 ม. ทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน โดยตรวจวัดความกว้าง สภาพพื้นผิวถนน (เช่น มีรอยหรือไม่มีรอย) ความลาดเทสองมิติของถนน ค่าประเมินการทรุดตัว ขนาดของทางรถและร่องน้ำ และตะกอนที่พบ

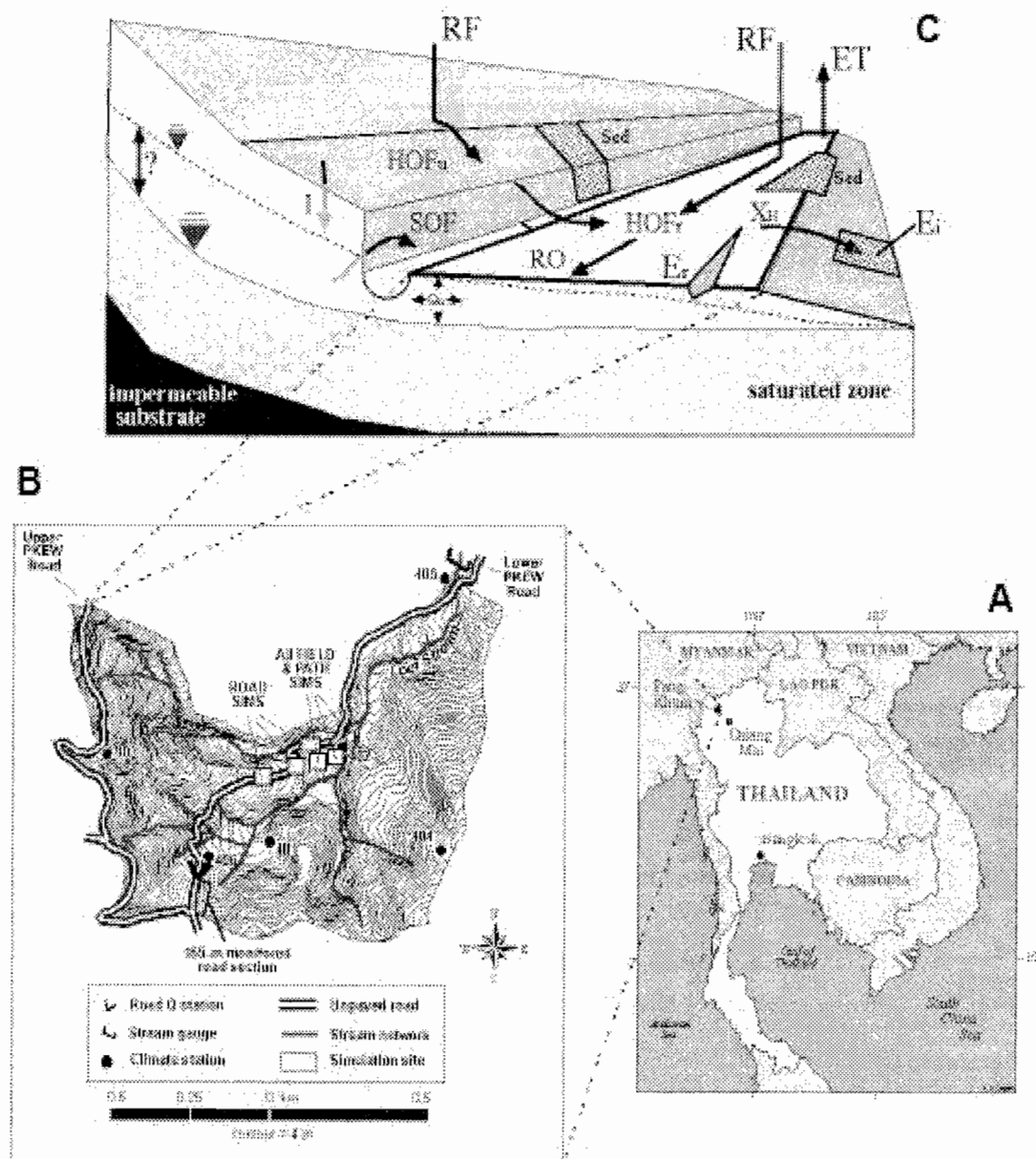
(3) จัดบันทึกรายการแหล่งตะกอนจากถนนเส้นทางที่มีน้ำไหลบ่าและจุดที่น้ำไหลบ่าลงมาและไหลออกไป บนถนนทุกสายในพื้นที่

(4) ตรวจวัดด้านอุทกวิทยา และด้านกายภาพ เช่น สัมประสิทธิ์การนำน้ำที่อิ่มตัว ( $K_s$ ) ความหนาแน่นรวม (BD) ความต้านการซึมลึกของดิน (PR, โดยใช้ Lang penetrometer) และเนื้อดิน ณ จุดต่างๆ ทั้งบนถนนทุกสาย และบนหน้าดินของพื้นที่ที่มีการใช้ที่ดินในรูปแบบอื่นๆ

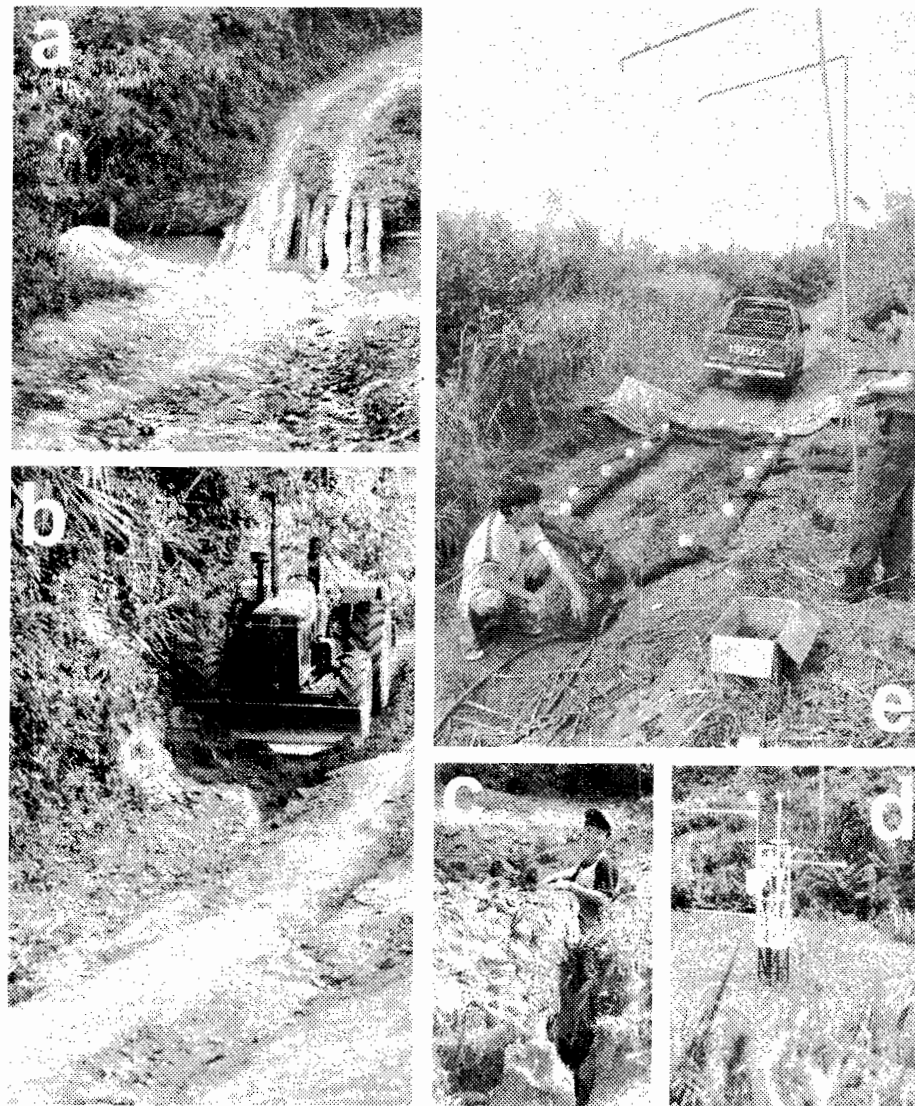
### 2) ติดตั้งเครือข่ายตรวจวัดลักษณะอากาศ

#### (Climatological network in PKEW)

สถานีเครือข่ายสำรวจลักษณะอากาศ ได้ติดตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2540 ประกอบด้วย เครื่องตรวจบันทึกใช้ในการบันทึกรายละเอียดลักษณะอากาศแนวดิ่งเพื่อใช้ในการปรับแก้ (calibrating) การยืนยันความถูกต้อง (validating) ในแบบจำลองคณิตศาสตร์



**Figure 1** (A) Research site near Pang Khum Village in Northern Thailand; (B) the 93.7 ha. Pangkhum Experimental Watershed (PKEW); (C) hydrological and erosional processes operating on the 3-dimensional.



**Figure 2** (a) termination of a road section at a stream crossing; (b) road maintainance during interstorm periods is one source of loose surface material; (c) a deep gully on the upper PKEW; (d) climate station 402 within an upland rice field in PKEW; (e) the rainfall simulator and plot during one of the road rainfall simulation, 1998.

KINEROS2 (Smith *et al.*, 1999) เพื่อจำลองสถานการณ์น้ำไหลบ่าบนถนนและการชะล้างพังทลาย สถานีตรวจวัดอากาศหมายเลข 401 และ 402 ใช้บันทึกข้อมูลละเอียดทางอุตุนิยมวิทยาเพื่อใช้ในการจำลองแบบการแผ่ของความร้อนแฝงและความร้อนเหนือผิวดิน เครื่องวัดที่สถานี 401 ติดตั้งอยู่เหนือ

ป่าธรรมชาติที่ถูกรบกวน สูง 17 ม. ส่วนสถานี 402 ตั้งอยู่บริเวณไร่เลื่อนลอย สถานี 403 และ 404 วัดปริมาณน้ำฝนและความชื้นในดิน สถานี 405 ตรวจวัดน้ำท่า (โดยการบันทึกระดับความสูงของน้ำที่ไหลผ่านอาคารวัดน้ำชนิดฝายสันกว้าง (broad-crested weir) ที่มีความกว้าง 3 ม.) และปริมาณน้ำฝน

ที่ปากลุ่มน้ำ (Outlet) สถานี 406 ซึ่งตั้งอยู่อีกฝั่งหนึ่งของถนนใกล้กับทางเข้าลุ่มน้ำกำหนดขึ้นเพื่อให้ตรวจวัดน้ำฝนและความชื้นในดินของผิวถนน เพื่อใช้กำหนดความชุ่มชื้น (soil wetness) ของดินก่อนฝนตกที่ต้องใช้ในการจำลองแบบ (modeling)

### 3) การทำฝนเทียมจำลองสถานการณ์ฝน (Rainfall simulation experiments)

ในปี พ.ศ. 2541 และ 2542 ได้ทำฝนเทียมจำลองสถานการณ์ฝนจำนวน 5 ชุด ซึ่งกำหนดขึ้นจากฝนที่ตกทั้งหมดกว่า 100 ครั้ง (storms) เพื่อกำหนดสถานการณ์ต่างๆ คือ (1) การก่อให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดินและส่งผลต่อการพัดพาตะกอนของถนน บริเวณทางสัญจร และผิวหน้าที่ทำการเกษตรแบบต่างๆ (2) จำแนกการกัดเซาะออกเป็นแบบกระเด็นของน้ำบนพื้นผิว (splash erosion) และแบบผิวแผ่น (sheet erosion) ซึ่งจำเป็นในการจำลองแบบการชะล้างพังทลายของถนนด้วยแบบจำลอง KINEROS2 และ (3) กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้และการบำรุงรักษารถที่มีผลต่อการก่อให้เกิดตะกอนของถนน

การทำฝนเทียมจำลองสถานการณ์การตกของฝนเหล่านี้ใช้ระยะเวลา 40–60 นาทีบนแปลงทดลองขนาดเล็ก (ขนาดตั้งแต่ 3.0–3.4 ม.<sup>2</sup>) ให้มีความหนาแน่นของพลังงานฝนที่ตก (EFDs) มีค่า 1650 ถึง 2050 Jm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> ตกอยู่นานประมาณ 10–20 นาที ที่มักเกิดในช่วงฝนตกหนักในรอบปีของพื้นที่ PKEW (ทั้งนี้ได้จากการวิเคราะห์เบื้องต้นของปริมาณน้ำฝนที่ตกในสองปี) เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์น้ำบนถนนกับข้อมูลของน้ำท่าและการพัดพาตะกอนที่เกิดจากน้ำไหลบ่าตามธรรมชาติบนถนนช่วงต่างๆ กล่าวคือได้สร้างสถานีสำหรับเก็บบันทึกปริมาณของน้ำไหลบ่าที่ด้านล่าง

ของถนนที่มีความลาดชันยาว 165 เมตร ใกล้กับสถานี 406

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### 1) กระบวนการน้ำบ่าหน้าดินและการกัดเซาะบนถนน

จากการสังเกตการเกิดน้ำไหลบ่าและการพัดพาตะกอนบนความยาวของถนนสายหนึ่ง (Road Prism) ดังในภาพที่ 1C จะพบว่าสาเหตุหนึ่งของน้ำไหลบ่าบนพื้นผิวถนน (Road surface runoff, RO) เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการซึมผ่านผิวถนนโดยปกติแล้วจะต่ำมาก (ผิวดินที่อัดแน่น) จึงก่อให้เกิด Horton overland flow (HOF) อย่างรวดเร็วบนผิวถนน แม้แต่ในช่วงที่มีฝนในปริมาณที่ต่ำ (Ziegler and Giam belluca, 1997a) ในบางกรณี น้ำไหลบ่าซึ่งเกิดบนพื้นผิวใกล้เคียง (HOR<sub>u</sub>) อาจไหลบ่าลงมาบนถนน และทำให้เกิดการเจิ่งนองบนถนนมีปริมาณมากขึ้น ความชื้นของดินที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้น (antecedent soil moisture,  $\theta_n$ ) ก็มีผลก่อให้เกิด HOF ได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ระยะเวลาการเกิดน้ำไหลบ่าบนผิวถนนเปียกจะสั้นกว่าบนผิวถนนแห้ง ผิวหน้าความชื้นของถนน ( $\theta_n$ ) นั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน (RF), อัตราการระเหย (ET) และความลึกของระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งปัจจัยตัวหลังนี้มีส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดการเจิ่งนองบนผิวถนน ตัวอย่างเช่น การเกิดน้ำบ่าหน้าดินแบบดินอิมตัว (SOF) จะเกิดขึ้นเมื่อระดับน้ำใต้ดินขึ้นสูงกว่าระดับพื้นผิวถนนและน้ำบนดินและซึมออกมาไหลท่วมบนถนน เส้นไขว้ปลาและเส้นคู่ในภาพที่ 1C แสดงความผันแปรของระดับน้ำใต้ดิน SOF อาจเกิดบนหน้าตัดของถนน (road cut) ซึ่งน้ำใต้ดินไหลออกมาจากส่วนนี้และลงมาผสมกับน้ำบ่าบนผิวถนน

เมื่อน้ำไหลบ่าหน้าดินเกิดขึ้นบนผิวถนนแล้ว ก็มักจะคงสภาพการไหลอยู่บนถนนเป็นระยะทาง ตั้งแต่สิบถึงหลายร้อยเมตรจนกว่าจะไหลลงสู่ลำธาร ( $X_r$ , รูปที่ 5) หรือไหลไปตามลาดเขา ( $X_H$ ) การเชื่อมต่อกันของถนนหลายสายทำให้น้ำไหลบ่าหน้าดินนี้ ไหลลงสู่เครือข่ายลำธารในเปอร์เซ็นต์สูง ในขณะที่ น้ำไหลบ่าไหลจากถนนไปตามลาดเขา อาจจะแทรกซึม (I) หรือกัดเซาะตัดลาดเขา ( $E_r$ ) และพัฒนากัดเซาะต่อไปเป็นเส้นทางน้ำไหลและอาจทำให้เครือข่ายลำธารหมดไปได้ในที่สุด น้ำไหลบ่าหน้าดินจากพื้นผิวถนนที่มีปริมาตรต่ำสามารถพัฒนาอนุภาคดินบนพื้นผิวและก้อนหินเล็กๆ บนผิวถนนไปได้ ขณะที่น้ำที่ไหลบ่ายังคงไหลต่อไปตามเครือข่ายถนนนั้น ความลึกและอัตราความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อไหลไปได้สักระยะหนึ่งก็จะถึงความเร็ววิกฤติที่สามารถกัดเซาะพื้นผิวถนน ( $E_r$ ) โดยมักจะเริ่มขึ้นที่ทางรถและรอยล้อรถที่มีอยู่ ในกรณีที่ไม่มีย่อลึก (gully) และการถล่มของมวลดิน (mass wasting) การชะล้างพังทลายของถนนจะถูกควบคุมโดยกระบวนการการชะล้างพังทลายแบบร่องริ้ว (rill) และระหว่างร่องริ้ว (interrill) อันเป็นกระบวนการเดียวกันที่เกิดขึ้นตามพื้นที่เกษตรกรรม กระบวนการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ (1) พลวัต (dynamic) ของฝนที่ตกแต่ละครั้ง ซึ่งรวมไปถึงความหนักเบาของฝน การซึมผ่านผิวดิน สภาพการไหลของน้ำบ่าหน้าผิวดิน (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความลึกของน้ำบ่าผิวดิน) และ (2) ความยากง่ายของดินในการถูกชะล้าง (soil erodibility) ซึ่งรวมความต้านทานต่อแรงเฉือน (shear strength) ด้วย

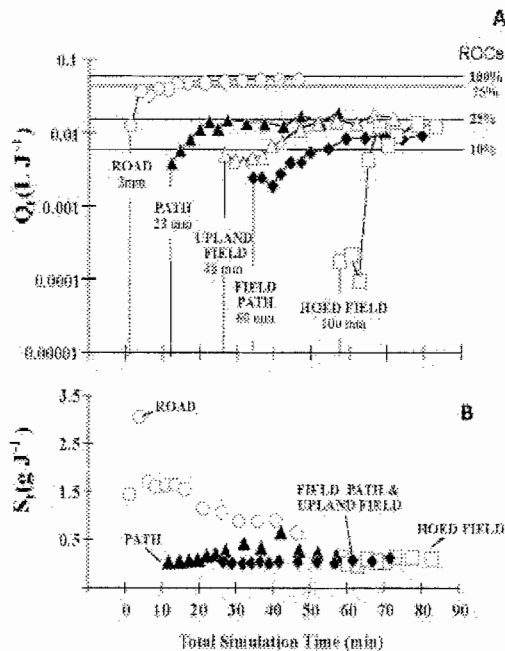
## 2) การเกิดน้ำไหลบ่าบนถนน

ภาพที่ 3(A) แสดงลักษณะการเกิดน้ำไหลบ่าที่เกี่ยวข้องกับถนน และการใช้ที่ดินแบบต่างๆ ใน

ช่วงระหว่างการทดลองจำลองสถานการณ์ด้วยความหนักเบาของฝนที่สูง ( $\approx 100-110 \text{ mm.h}^{-1}$ ) ในสภาพความชื้นดินแห้งที่มีมาก่อนหน้านี้แล้ว ( $0.040-0.12 \text{ g.g}^{-1}$ ) นั้น การเกิด HOF บนพื้นผิวที่ไม่ใช้ถนนต้องใช้ปริมาณน้ำฝนจำนวนมาก แต่ในทางตรงข้าม HOF ที่เกิดบนถนนสามารถเกิดได้ตั้งแต่ช่วงต้นๆ ที่ฝนเริ่มตก และสัมประสิทธิ์ของการเกิดน้ำไหลบ่าบนถนนจะมีค่าสูง (Road runoff coefficients, ROC) ในช่วงฤดูฝนปี พ.ศ. 2541 ประมาณ 41 % ของปริมาณฝนที่ตกใน 2 นาที ณ สถานี 406 มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่ออิ่มตัว ( $K_s$ ) ของถนน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความถี่สูงของฝนมีศักยภาพในการก่อให้เกิด HOF ในช่วงฤดูฝนเมื่อความชื้นที่ผิวดินมีปริมาณสูงนั้นเพียงไม่กี่นาทีเมื่อฝนมีความหนักเบาเกินค่า  $K_s$  ก็จะเกิด HOF บนพื้นผิวถนนบ่อยๆ (ตารางที่ 1)

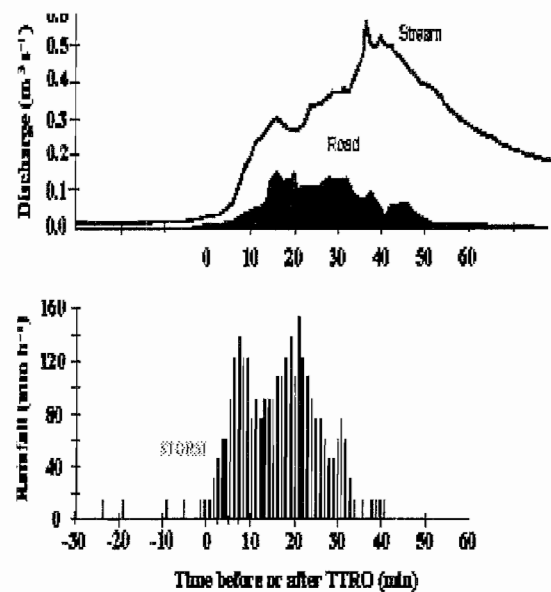
## 3) การพัฒนาของน้ำไหลบ่าในลุ่มน้ำ

เส้นทางที่น้ำบนผิวดิน (surface water) และน้ำใต้ผิวดิน (subsurface water) จะเคลื่อนที่ไปยังเครือข่ายลำธารถือได้ว่าเป็นตัวกำหนดระยะเวลาและบทบาทของน้ำไหลบ่าที่มีต่อไฮโดรกราฟที่เกิดจากฝนที่ตกแต่ละครั้ง (Storm hydrograph) และเป็นตัวควบคุมอัตราการชะล้างพังทลายที่จะเกิดในช่วงที่ฝนตกประสิทธิภาพในการไหลลงสู่เครือข่ายลำธารของน้ำไหลบ่าที่เกิดบนถนนผันแปรไปตามระยะทางและเวลา ซึ่งกระบวนการการชะล้างพังทลาย และการสูญเสียมวลดิน สามารถเบี่ยงเบนทางเดินของน้ำและจุดออกของน้ำไหลบ่าได้ การประเมินค่าประสิทธิภาพของการพัฒนาน้ำบ่าและตะกอนของถนนตอนล่างในพื้นที่ลุ่มน้ำพบว่า 70% ของฝนส่วนใหญ่ที่ตกบนถนน (ภาพที่ 4) มีผลต่อไฮโดรกราฟใน



**Figure 3** (A) Energy-normalized instantaneous discharge ( $Q_i$ ), Runoff coefficients (ROCs,%), and rainfall depth (mm) before runoff generation for several landuse types in PKEW during rainfall simulations; (B) normalized sediment output ( $S_i$ ).

ลุ่มน้ำช่วงที่มีพายุใหญ่สุดในปี 2541 (STORM) ที่มีปริมาณฝนทั้งหมด 51.5 มม. โดยปริมาณฝนส่วนใหญ่จะตกในช่วง 30 นาทีแรกหลังจากที่น้ำไหลบ่าเริ่มก่อตัวและค่าเฉลี่ยความหนักเบาของฝนอยู่ที่ 89  $mm.h^{-1}$  ค่าความหนักเบาสูงสุดคือ 154  $mm.h^{-1}$  ในช่วงครึ่งชั่วโมงแรกหลังจากที่น้ำไหลบ่าเริ่มก่อตัว HOF จากถนนเพียงอย่างเดียวมีส่วนของไฮโดรกราฟประมาณ 10 % ระยะทางและทิศทางของ HOF บนถนนจะถูกกำหนดเบื้องต้นโดยตัวแปรทางธรณีสัณฐานวิทยาและเกี่ยวข้องกับลักษณะของกลุ่มน้ำด้วย ซึ่งได้แก่ลักษณะภูมิประเทศ สันเขาดลาดจนที่ตั้งของหุบเขา ความลาดชัน และระยะทางไปสู่ลำธาร



**Figure 4** Road runoff contribution to basin storm hydrograph for the large rain event of 1998 (STORM).

ด้วยเหตุที่ส่วนต่างๆ ของถนนโยงใยถึงกันด้วยระบบร่องน้ำและลำธาร ขอบเขตของพื้นที่ทางอุทกวิทยาน้ำไหลบ่าอาจกว้างกว่าขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำธรรมชาติ ดังนั้นน้ำไหลบ่าซึ่งเกิดบนถนนในลุ่มน้ำหนึ่งจึงสามารถก่อให้เกิดผลกระทบของน้ำไหลบ่าและชะล้างพังทลายในลุ่มน้ำใกล้เคียงได้ ตัวอย่างเช่น เครือข่ายของถนนใน PKEW ตอนล่างซึ่งมีความยาว 130 ม. (ช่วง B-C ในวงกลมที่ 1 ภาพที่ 5) เป็นตัวนำพาน้ำไหลบ่าจากลุ่มน้ำใกล้เคียง ไหลบ่าไปตามถนนที่มีลำธารหรือร่องน้ำตัดผ่านเข้าสู่พื้นที่ PKEW และไหลเข้าสู่เครือข่ายลำธาร ณ จุดสะพานไม้ที่เชื่อมโยงพื้นที่ลุ่มน้ำได้ หากถนนสายนี้รับน้ำ

ไหลบ่าที่เกิดขึ้นบนทางลาดช่วงบนบนพื้นที่ที่ไม่ใช้ถนน ผลกระทบทางด้านอุทกวิทยาก็จะยิ่งมีมากขึ้น ในทำนองเดียวกันช่วง D-E (วงกลมที่ 2 ภาพที่ 5) ในทางกายภาพแล้วก็อยู่นอก PKEW แต่มีจุดทางออกของน้ำไหลบ่าภายในลุ่มน้ำ (จุด E)

อิทธิพลของถนนตอนบนใน PKEW ที่มีต่อสภาพทางอุทกวิทยาในลุ่มน้ำมีความแตกต่างกันไปตามความหนักเบาของฝนและสภาพของผิวดิน น้ำผิวดินที่เกิดขึ้นบนช่วง F-G จะมาบรรจบกันและไหลออกสู่ลำน้ำสาขาชั่วคราวทางตอนบนของเครือข่ายลำธารน้ำที่เกิดขึ้นได้ G จะไหลออกไปจากลุ่มน้ำ ณ จุดโค้งจุดแรก (H) น้ำไหลบ่าจะถูกแยกออกเป็นสายๆ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดว่าน้ำจะไหลกลับเข้าพื้นที่ PKEW อีกหรือไม่ สำหรับการไหลที่มี

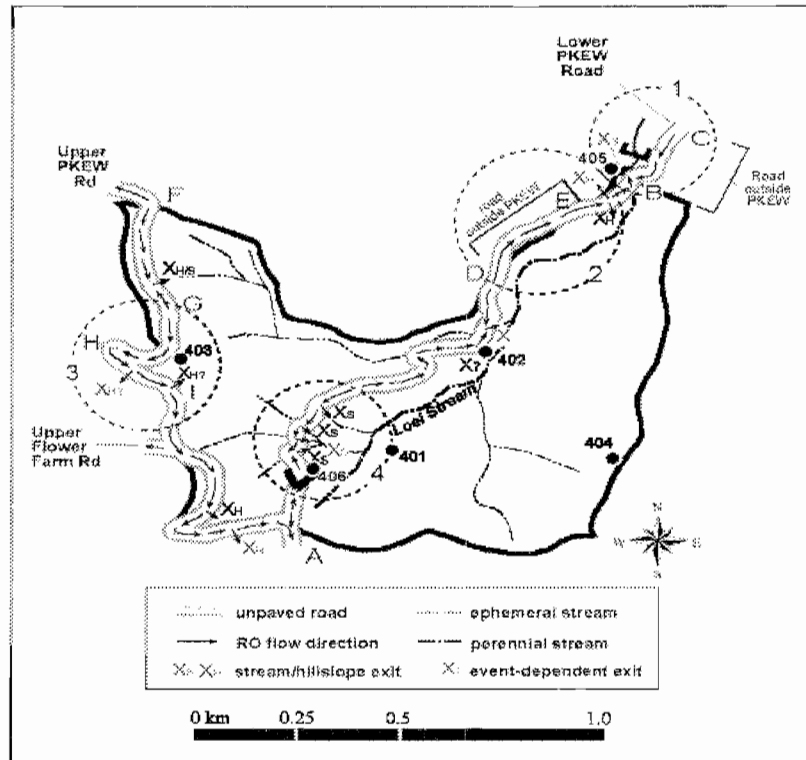
ปริมาตรต่ำ น้ำไหลบ่าจะไหลลงไปตามถนนตามระบบร่องที่เกิดจากยานพาหนะ และออกไปจากลุ่มน้ำ ถ้าการไหลออกมีค่าเกินค่าสูงสุดที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ (threshold) ที่ประมาณ  $0.7 \pm 0.3 \text{ m}^3/\text{วินาที}$  (จากการประเมินภาคสนามเมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2541) น้ำไหลบ่าจะไหลข้ามไปยังคูที่ถูกน้ำกัดเซาะลึก (ราวๆ 1.3 ม. (กว้าง) x 0.4 ม. (ลึก)) ซึ่งอยู่ด้านในของถนนและเป็นร่องที่นำน้ำไหลบ่าไปสู่จุดทางออกบนลาดเขา (i) ภายใน PKEW การไหลข้ามไปสู่คูนี้เป็นการไหลในลักษณะชั่วคราวและเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปตามการจราจรของขบวนยานบนถนนนี้ (ซึ่งก่อให้เกิดร่องทางรถ) และต่อกิจกรรมการบำรุงทาง (ซึ่งได้แก่การซ่อมแซมร่องทางรถ)

**Table 1** Mean compaction- and infiltration-related variables for the sedimentation surfaces.

| Treatment    | TTRO <sup>1/</sup><br>(min) | BD<br>(Mg m <sup>-3</sup> ) | PR<br>(MPa)       | K <sub>s</sub><br>(mm h <sup>-1</sup> ) |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| Road         | 1.1±0.3<br>(8)a             | 1.45±0.13<br>(74)b          | 6.4±0.4<br>(160)d | 15±9<br>(26)a                           |
| Access path  | 12.1±3.5<br>(3)b            | 1.40±0.11<br>(21)b          | 6.4±0.7<br>(90)d  | 8±5<br>(6)a                             |
| Field path   | 34.1±12.8<br>(4)c           | 1.24±0.11<br>(22)a          | 2.8±1.1<br>(40)b  | 244±88<br>(10)b                         |
| Hoed field   | >57.8<br>(4) <sup>2/</sup>  | 1.19±0.06<br>(22)a          | 1.8±1.2<br>(40)a  | 316±129<br>(10)b                        |
| Fallow field | >60<br>(4) <sup>2/</sup>    | 1.11±0.05<br>(6)a           | 1.7±0.9<br>(60)a  | 129±38<br>(6)b                          |

<sup>1/</sup> TTRO is time to runoff (TTRO); BD is bulk density; PR is penetration, and K<sub>s</sub> is saturated hydraulic conductivity; value are ± one standard deviation; values in parentheses are simulation replications or sample sizes; values in each column with the same letter are NOT statistically different (one-way analysis of variance (ANOVA) on log<sub>10</sub>-transformed data), followed by post-hoc multiple comparison testing with the Bonferroni/Dunn test (B-D) when the F-values were significant at  $\alpha = 0.05$ .

<sup>2/</sup> Only one of four Hoed field events produced runoff; none of the four Fallow field simulations produced runoff.



**Figure 5** Road surface water flow paths and locations of several road-related geomorphological features affecting hydrological response in PKEW (letter A through H).

#### 4) การชะล้างพังทลายของถนน

ปริมาณตะกอนต่อพลังงาน ( $S/\text{g}^{-1}$ ) จากพื้นที่ถนนโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับอัตราไหลสูงสุดของน้ำบ่าหน้าดิน ซึ่งจะเกิดขึ้นภายในช่วง 2-3 นาทีแรกหลัง TTRO คิดตามด้วยค่า  $S_t$  ที่ค่อยๆ ลดต่ำลงตลอดช่วงระยะเวลาที่เหลืออยู่ของการจำลองสถานการณ์ (รูป 3B) จุดสูงสุดของ  $S_t$  สัมพันธ์อยู่กับเศษวัสดุที่พื้นผิวที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างฝนตกเมื่อวัสดุที่อยู่บนพื้นผิวถูกขจัดหมดไป ตะกอนที่เกิดขึ้นจะถูกเคลื่อนย้ายไปบนผิวถนนที่อัดแน่น ไม่ว่าจะเป็นเวลาใดก็ตามที่พื้นผิวถนนและวัสดุได้ชั้นดินถูกอัดแน่น ปริมาตรของวัสดุสร้างถนนจะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอตามสถานการณ์น้ำบ่าหน้าดิน การจราจร การบำรุงรักษา และดินที่ถล่มลงมาเนื่องจากการเกิดตะกอนผิวหน้าถนนเป็นปรากฏ-

การณ์ที่เป็นพลวัต การพัดพาตะกอนออกไปจากพื้นที่จึงผันแปรไปทั้งในขณะที่ฝนตกอยู่และระหว่างที่ฝนตกแต่ละครั้ง โดยทั่วไปถนนที่มีการจราจรสูงจะมีอัตราการเกิดตะกอนสูง (Reid and Dunne, 1984) ในทางตรงกันข้าม อัตราการพัดพาตะกอนบนถนนอาจต่ำได้ หากระหว่างที่มีพายุฝนเกิดขึ้นนั้นน้ำบ่าหน้าดินก่อนหน้านั้นได้พัดพาเศษวัสดุส่วนใหญ่แล้ว

#### สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้ใช้ทั้งการตรวจวัดจากสถานการณ์จริงและสถานการณ์จำลอง สรุปได้ว่าการที่ผิวถนนมีอัตราการซึมน้ำต่ำก่อให้เกิดน้ำบ่าหน้าดินบนถนนดินได้บ่อยครั้งและเริ่มเกิดได้เร็วกว่าในระหว่างที่มีฝน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเกิดน้ำท่วม

ป่าบนพื้นที่ผิวดินอื่น การเกิดน้ำป่าหน้าดินแบบ HOF ภายในพื้นที่เกษตรโดยปกติแล้วจะมีน้อยมาก ยกเว้นบนพื้นที่ผิวดินที่มีการใช้งานเช่นเดียวกับ ถนน การขยายเครือข่ายถนนมีผลต่อการเกิดน้ำไหล ป่าหน้าดินในช่วงที่มีฝนตกหนักในบริเวณลุ่มน้ำ และจะเปลี่ยนแปลงไปตามกิจกรรมและเหตุการณ์ ต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนเส้นทางการไหลที่พื้นผิวดิน บนถนน เนื่องจากร่องทางรถและระบบร่องน้ำได้ เชื่อมบริเวณที่เป็นร่องน้ำไหลป่าแต่ละแห่งเข้าด้วยกัน เป็นเส้นทางต่อเนื่องกัน น้ำไหลป่าที่เกิดบนพื้น ผิวดินในลุ่มน้ำหนึ่งอาจถูกพัดพาไปสู่อีกลุ่มน้ำ หนึ่งได้และจะทำให้มันมีศักยภาพในการก่อให้เกิด ผลกระทบทางด้านอุทกวิทยาและลักษณะธรณี สันฐานในบริเวณลุ่มน้ำทั้งคู่ด้วย

การใช้แบบจำลอง KINEROS 2 จะประเมินได้ดี ที่สุด เมื่อลักษณะของเศษวัสดุดินชั้นบนถูกนำมา พิจารณาร่วมด้วย

### เอกสารอ้างอิง

จำนงค์ ปราณสุจริต. 2526. ผลกระทบของวิวัฒนาการใช้ ประโยชน์ที่ดินต่อน้ำในลำธารและตะกอน แขนงลอยในลุ่มน้ำแม่กลาง, เชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวน ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

Grayson, R.B., S.R. Haydon, M.D.A. Jayasuriya, and Finlayson, B.L. 1993. Water quality in the mountainous ash forest: Separating the impact of roads from those of logging operation. J. Hydrol, 150, 459–480.

Horton, R.E. 1993. The role of infiltration in the hydrologic cycle. EOS, Am. Geophys. Union. Trans. 14, 446–460.

Megahan, W.F. 1983. Hydrologic effects of clear-cutting and wildfire on steep granitic slopes in Idaho. Water Resour. Res. 19(3): 811–819.

Megahan, W.F. and G.L. Ketcheson, 1996. Predicting down slope travel of granitic sediments from forest roads in Idaho. Water Resour. Bull. 32 (2): 371–382.

Reid, L.M., and T. Dunne, 1984. Sediment production from forest road surface, Water Resour. Res., 20, 1753–1761.

Smith, R.E., D.C. Goodrich, and C.L. Unkrich, 1999. Simulation of selected events on the Catsop catchment by KINEROS2. A report for the GCTE conference on Catchment scale erosion model. Catena 37: 457–475.

Van der Plas, M.C., and L.A. Bruijnzeel. 1993. Impact of mechanized selective logging of rainforest on topsoil infiltrability in the Upper Segama area, Sabah, Malaysia. Hydrology of Warm Humid Regions (Proc. of the Yokohama Symposium), July 1993. IAHS Publ. 216.

Ziegler, A.D. and T.W. Giambelluca, 1997a. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. J. Hydrol. 196 (1/4): 204–229.

Ziegler, A.D. 2000. Toward Modeling Road Erosion in Northern Thailand. Ph.D. dissertation, Geography Dept., University of Hawaii, Honolulu, HI. 104 p